



TESIS DOCTORAL
Para optar al grado de
DOCTOR

Directores: Dr. Felix Schmid
Dr. Diego José Pedregal Tercero

Fausto Pedro García Márquez

**DESARROLLO DE NUEVOS ALGORITMOS
APLICADOS AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO
ÓPTIMO CENTRADO EN LA FIABILIDAD Y LA
MONITORIZACIÓN REMOTA BASADA EN LA
CONDICIÓN (RCM²)**

I.S.B.N. Ediciones de la UCLM
84-8427-368-7



Ediciones de la Universidad
de Castilla-La Mancha

Cuenca, 2005

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

El trabajo que a continuación se presenta ha sido posible básicamente gracias, entre otros, a sus directores Felix Schmid y Diego José Pedregal Tercero.

Felix fue mi tutor en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sheffield, Inglaterra, en el año 2000. Durante este período pude colaborar en un proyecto de investigación que se llevó a cabo entre dicho departamento y la empresa inglesa Balfour Beatty Rail. Este trabajo ha servido de cimiento para desarrollar el contenido del presente documento. Posteriormente, Felix también fue mi tutor en el mismo departamento en los años 2001 y 2002. Desde el primer momento me ha mostrado todo su apoyo y confianza en mi trabajo como investigador, lo cual ha sido clave para poder llegar hasta la redacción de estas líneas.

Diego, en cambio, primero fue mi compañero en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSI) de Ciudad Real en el año 2000. Posteriormente, en el año 2002, me ofreció su apoyo incondicional en la dirección de este trabajo. Además, me facilitó todo lo relativo a mi relación contractual con la UCLM. Gracias a esto, actualmente estoy disfrutando mucho trabajando con él. Desde el principio siempre ha hecho posible que tuviera la confianza y motivación que precisa la docencia e investigación, respaldándome especialmente en los momentos en los que más lo he necesitado. Creo que mi agradecimiento hacia él no es tan sólo en el campo profesional, sino que también lo es, y en mayor medida, en lo personal, ya que me ha mostrado en todo momento su carácter humano, así como un gran derroche de confianza y amistad. Lo que desearía ahora es aprovechar la posibilidad que me permite hoy en día el poder seguir aprendiendo de él, y deseando que esto pueda ser por mucho tiempo.

Durante este tiempo he requerido de la financiación necesaria para poder realizar las estancias en esta universidad (UCLM), así como en otras universidades y centros de investigación, que ha servido para desarrollar esta tesis. Esto ha sido posible gracias al tutor del presente trabajo, Javier Conde Collado. Javier fue inicialmente también el director de la misma. Siempre me ha dado plena libertad para desarrollar mi investigación. Esto me ha permitido trabajar en las universidades de Piura (Perú, 1999), Antioquia y Nacional (Colombia, 1999), Sheffield (Inglaterra, 2000, 2001 y 2002), Valencia (2001) y la de Colorado at Boulder (EEUU, 2001). También me apoyó en lo relativo a la obtención de la financiación para realizar

ponencias en congresos como los celebrados en Washington (EEUU, 2003) y Estambul (Turquía, 2003).

En algunos momentos he tenido la tentación de desistir en la consecución y realización de esta tesis, especialmente durante el primer año. Fue cuando, por medio y gracias a mi hermano Luis, conocí a Jesús García-Tenorio Ronda, quien me hizo comprender que esto no es nada fácil, aunque algunos ignorantes piensen que los que nos dedicamos a la investigación perdemos el tiempo durante todo el día, como por ejemplo navegando por placer en Internet. También aprendí que, sobre todo, debemos confiar en nuestro propio esfuerzo para lograr lo que nos proponemos. Jesús también me brindó el apoyo necesario para incorporarme a la Universidad Complutense de Madrid cuando tenía las puertas prácticamente cerradas en la UCLM.

Respecto al contenido de la tesis, en un principio pretendí desarrollarlo en el campo de los algoritmos metaheurísticos. Fue Rafael Martí, de la Universidad de Valencia, quien me motivó con dicha idea y con quien pude trabajar en Burjassot (Valencia) en el año 2001. Por medio de Rafa conocí a Manuel Laguna. Rafa me propuso la idea de trabajar con Manuel en la Universidad de Colorado at Boulder (EEUU), idea que se consumó en realidad en el año 2001. He de destacar de ellos que, además de ser unos de los mejores profesionales en el campo de los algoritmos metaheurísticos, son unas grandes personas.

En todo momento he estado vinculado a la ETSII de Ciudad Real (UCLM). Quisiera destacar el apoyo que he encontrado en las que personas que la constituyen (tanto el personal de limpieza, administrativos, becarios, profesores, etc.), especialmente a los compañeros del área, M^a Carmen Carnero Moya y Esperanza la Torre (aunque actualmente no pertenece a la ETSII). Fue el actual director de esta Escuela, Vicente Feliu Batlle, quien me prometió desde un principio una continuidad en la Escuela si conseguía unos objetivos, aunque no tuviera el apoyo de ningún profesor, y así fue, aunque finalmente conté con el apoyo de Diego Pedregal. Quiero manifestar mi más sincero agradecimiento hacia Vicente. Este hecho me ha permitido confiar aún más en mi esfuerzo y dedicación en el trabajo.

De las cosas que más me ha reportado la tesis ha sido poder conocer a mucha gente y crear nuevas y muy buenas amistades. Quiero destacar a las originadas en Ciudad Real e Inglaterra. De Ciudad Real han sido y son: Juan Pedro, José Angel, Miguel Ángel, M^a Carmen, Chari, M^a Ángeles, Teresa, Pablo, etc.; y en Inglaterra: Elena, Ana, M^a Ángeles, Olatz, María, Josico, David, Avi, Diane, Nuria, Alberto, Charles, etc. Esto no quiere decir que me esté olvidando de los amigos de siempre, como son: el “Chino”, el “Cabo”, Iván, Jesús, Nicolás, Gustavo, Oscar, Pedro, Pedrucho, José Ignacio, Upe, M^a Ángeles, Maju, Serrano, Rosa, Gema, Félix, etc., así como el grupo de los Chivi-Chivis: Jorge, Juan, Víctor, Bernardo, David, Pedro, Rafa, Pepe, Antonio, Juan José, y sus Chivi-Chivas. También quiero agradecer el apoyo

personas que he conocido en otros parajes como Colombia, Perú, Ecuador, Estados Unidos,... Ellos son, entre otros, José Ramón, Olga, Silvia, Ximena, Norela, Juan David, Mónica, Jorge Hernán, Alexander, Yolanda, Carlos Coello, Arantza, D. Suñer, Damián, etc.

Un especial agradecimiento va dirigido a una persona muy importante actualmente en mi vida. Ella ha sido la que durante este último y difícil año ha estado, literalmente, día tras día conmigo, animándome y empujándome en este, en ocasiones, difícil trabajo. ¡Muchas gracias por todo Rut!

Todas las personas que hasta ahora he mencionado tienen una relación directa o indirecta con esta tesis en cualquiera de sus fases, pero tan sólo mis padres y hermanos han sido los que siempre y en cada instante me han estado alentando. Ellos han sido, sin duda, el pilar en el que me he apoyado durante todo este tiempo, especialmente en los momentos más difíciles, y es por ello que esta tesis se la dedico a ellos.

Para concluir quisiera disculparme ante todo aquel que crea que debería haber sido mencionado en las anteriores líneas y no lo ha sido.

ÍNDICE

Chapter 1. Introduction	1
1.1 Introduction	5
1.2 Maintenance System.....	6
1.3 Point mechanism description.....	8
1.4 Faults analysis	9
1.5 Model for detecting Faults	11
1.6 Kalman Filter	14
1.7 Thesis layout	14
References	17
Capítulo 2. Evolución del Transporte Ferroviario	21
2.1 Conceptos básicos	25
2.2 Historia del ferrocarril en el ámbito internacional.....	25
2.3 Legislación relativa al ferrocarril en España	29
2.4 Políticas de inversión en el transporte en España.....	36
2.5 Antecedentes en el desarrollo del transporte ferroviario en la Unión Europea.....	43
2.6 Crecimiento y desarrollo del sistema ferroviario en la Unión Europea	46
Referencias	49
Capítulo 3. Desvíos ferroviarios	51
3.1 Exigencias para el cambio y mejora del mantenimiento de la superestructura ferroviaria.....	56
3.2 Nuevas tecnologías empleadas en la infraestructura ferroviaria	57
3.3 Importancia de los desvíos ferroviarios.....	59
3.4 Desvíos Ferroviarios	61
3.5 Evolución de los desvíos ferroviarios	76
3.6 Nuevas tendencias en el diseño de los desvíos ferroviarios.....	80
3.7 Tipos de desvío empleados en España.....	81
3.8 Análisis del mercado de los desvíos ferroviarios	86
Referencias	89
Anexo A1. Perfiles de carriles.....	92
Anexo A2. Características básicas de los desvíos tipo A, B, C, V y AV.....	98
Anexo A3. Dimensiones características de los desvíos tipo B, C, V.....	106

Capítulo 4. RCM²	119
4.1 Introducción: Conceptos básicos.....	122
4.2 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad	140
4.3 Monitorización remota basada en la condición	146
4.4 RCM ² aplicado a los sistemas ferroviarios	154
Referencias.....	159
Anexo I. Vector de camino mínimo y de corte.....	164
Anexo II. Terminología	165

Capítulo 5. Modelo de Detección de Fallos en RCM² Empleando el Filtro de Kalman Aplicado a los Desvíos Ferroviarios	167
5.1 Introducción.....	174
5.2 Descripción del hardware empleado en los experimentos.....	175
5.3 Modelo	182
5.4 Filtro de Kalman	191
5.5 Modelos de componentes no observables.....	206
Anexo I. Nomenclatura.....	218
Anexo II. Sensores empleados en los experimentos.....	220
Anexo III. Análisis de fallos	225
Anexo IV. Clasificación de Fallos en los en los Desvíos Ferroviarios.....	252
Anexo V. Breve biografía de Rudolph Emil Kalman	254
Anexo VI. Filtro de Kalman y Algoritmo de Suavizado Fijo	255

Chapter 6. Results and Conclusions	257
6.1 Summary	259
6.2 Results.....	261
6.3 Conclusions	266

1 Introduction

Railway operations have changed dramatically since the early 1990s, partly because of greater demand for train services and partly as a result of new European Union Directives (Directives 2001/12/EC, 2001/13/EC and 2001/14/EC). Performance targets have become more and more exacting, because unit costs have to be reduced to compete effectively with road and air, while customers for freight and passenger services are becoming ever more demanding as regards reliability and punctuality of services. This leads to more exacting requirements for the dependability of railway hardware, both rolling stock and infrastructure components.

Railway technology and operations are changing rapidly but the management of maintenance is not keeping pace. The author of the present thesis describe the drivers for improvements to the maintenance and infrastructure components on railways. However, traffic increases and shortened maintenance windows require better approaches to turnout maintenance. The author of this thesis focus on the latter and, more particularly, on points.

Reliability-Centred Maintenance (RCM_1) provides powerful rules for deciding whether a failure management policy is technically appropriate, providing precise criteria for deciding how often routine tasks should be carried out. The technique employs advanced electronics, sensors and transducers, computing and communications technology embodied in Remote Condition Monitoring systems (RCM_2). RCM_2 leads to improved reliability and can pay for itself in terms of cost-effectiveness since staff do not have to visit installations as frequently. The integration of the two types of RCM_i is called RCM^2 . The author of the present thesis has described an approach to RCM^2 as applied to railway turnout mechanisms, based on a case study.

The author provides information on the costs incurred in buying and maintaining a range of infrastructure elements and then focus on the condition monitoring of points as a tool for performance improvement. He describes the development of an algorithm which can be used to filter “as-commissioned” signatures of operating force signals of points, thereby allowing the identification of deterioration patterns. The study is based on 476 signatures of a single point subject to different artificially induced “fault” conditions.

It is very important that faults in point mechanisms can be detected quickly and with reliability. The analysis is carried out by means of a discrete dynamic system, where data is

acquired in real time. This requires a model simple enough to detect faults quickly and the capability of analysing data in real time. On the other hand, the model for detecting faults must adapt to external condition, i.e., environment (humidity, temperature climatic,...), friction force, etc., and the model must detect faults in both directions of the point mechanism movement. This was the main reason why the author employed a reference dynamic system. This is always the geometric mean between the last reference and the latest curve which has not been detected as indicative of a fault.

Two of the most pervasive tools of engineering are filtering and estimation. In the original experiments, the state of the point mechanism was estimated from noisy sensor information. Due to this, a lot of false alarms were detected. These false alarms are undesirable, due to the cost of searching for non existent faults. The author therefore employs a Kalman Filter to increase the reliability of the model for detecting faults in point mechanisms.

The Kalman Filter is an optimal recursive data processing algorithm which is in the form of a set of equations that allows an estimate to be updated once a new observation becomes available. When applied to discrete data linear filtering problems it is a powerful algorithm, because it supports estimations of past, present and future states. As a consequence, it can serve as a useful tool applicable to the condition monitoring system for predictive maintenance of the point mechanism analysed in this thesis.

Index of Contents

1	Introduction	1
1.1	Introduction.....	5
1.2	Maintenance System.....	6
1.3	Point mechanism description	8
1.4	Faults analysis.....	9
1.5	Model for detecting Faults.....	11
1.5.1	First Criterion: Irregularities in the Signal Shape	13
1.5.2	Second criterion: Deviation of maximum value position of the curves	13
1.5.3	Third Criterion: Signature symmetry with respect to the maximum value position..	13
1.6	Kalman Filter.....	14
1.7	Thesis layout.....	14
	References	17

Index of Figures

Figure 1.1.- Factors influencing fault levels in point mechanisms..... 10

Figure 1.2.- A basic monitoring system 11

Figure 1.3.- Criteria employed for detecting faults in point mechanism 12

1.1 Introduction

The safety of staff, customers and of the general public is generally viewed as one of the most important requirements in industry and is of particular importance in the railway industry, where passengers rightly expect high standards of care. In Britain the Railway Regulations were introduced in 1994 and a new safety culture was established. This was a necessary part of the privatisation process for British Railways (BR). It was also a consequence of the realisation that, from 1989 to 1994 alone, 825 members of the general public had been killed on BR. Most of these died as a result of trespass but substantial numbers by falling from trains [22], due to design faults and poor maintenance. Any accidents on the railways though are of serious concern to society, particularly so since the accidents at Shouthall, Ladbroke Grove, Hatfield, and, most recently, Potters Bar in Britain, Eschede and Brühl in Germany and Norway. Ever since its inception though, the railway industry has searched for ways to improve the safety and the reliability of the railway subsystems. Provision of a reliable infrastructure plays a very important role in achieving a safe system.

Railway operations have changed dramatically since the early 1990s, partly as a result of new European Union Directives, and performance targets have become more and more exacting. This is true for both rolling stock and infrastructure components but the author of the present thesis focus on the latter or, more precisely, on points¹. Over the life of a railway infrastructure, maintenance costs generally outweigh the first cost by a factor of two or three. This is particularly true for components such as points which have to operate frequently in demanding environmental conditions.

The performance of individual turnouts and groups of points, in terms of reliability and safety, must improve to accommodate higher speeds, greater axle loads, and shorter intervals between trains. The reliability must also improve to cope with the reduction in redundancy in track layouts of stations and junctions, which is necessary to reduce costs. Any failure of the point mechanisms including switch blades and linkages, causes delays and thus, deviation from the timetable, which eventually increases the operating cost [34] and which may result in reduced safety. In order to achieve savings in first cost and in the maintenance of turnouts it has become necessary to improve the monitoring and associated management systems. Severe failures may also result in reduced safety, as shown by the accident at Potters Bar (England), where loose fixings caused a derailment leading to 7 fatalities [33]. In order to achieve savings in first cost and in the maintenance of turnouts it has become necessary to improve the monitoring and associated management systems.

¹ Some authors refer to points as turnouts, i.e., the mechanism allowing trains to leave the main track.

The basic operation of points has remained the same since their development at the beginning of the railway era. The switch blades may only be in the normal or reverse position while trains traverse the points. To ensure correct and safe operation of points, position detection and locking devices for the switch blades have been developed. The former are electromechanical devices while the latter are generally mechanical components which prevent point movement due to vibration, etc. Both the detection and point locking systems increase the first cost of points and the continuing cost of their maintenance. Furthermore, they also lower the system reliability because of higher parts count, more complex installation procedures and the possibility of external influences affecting their performance. There is thus a need for new approaches to point control and monitoring which increase reliability, while reducing first and recurrent cost of point operation.

There are many combinations of factors that can lead to failures of the points mechanism [25]. Essentially, railway points are electro-mechanical systems with many components, subject to heavy static and dynamic loads as well as wear, in a hostile environment. Motors and mechanical drive systems must perform safely and reliably over a wide range of temperatures and other environmental conditions. This requires robust methods and management programmes, such as reliability centred maintenance and remote condition monitoring, generally involving advanced electronics, sensors and transducers and communications technology.

By using intelligent monitoring systems it is possible to predict problems and enable quick recovery. Such systems have been developed by Fararooy, Allan [4] and [5] and Roberts [36] at Birmingham University and have led to algorithmic models for the condition monitoring of point machines by detecting incipient faults. The acquisition and processing of information concerning the condition and operational state of point mechanisms allows maintenance to be provided in a more efficient and cost effective manner, directing staff towards the exact cause of defects, thus allowing the faults to be rectified more quickly. The likelihood of equipment failure in service is greatly reduced, minimising disruption to rail services. As routine maintenance is only directed at individual point machines when required, the need for regular scheduled inspections and preventative maintenance of the equipment is greatly reduced. This results in a reduction of the risk to maintenance personnel, of the cost of such inspections and of the potential of failure because of unnecessary interventions [34].

1.2 Maintenance System

The annual cost of maintaining points per unit is high, when compared with, e.g., track circuits. It is also clear that the points have a very high total failure cost per unit. It is therefore necessary to employ maintenance systems that are less costly and create a more reliable infrastructure.

Reliability-Centred Maintenance (RCM₁) was originally developed by the civil aviation industry to define effective maintenance schedules for aircraft [26]. Over the past twenty years, the technique has been applied outside the airline industry to almost every type of industrial manufacturing and process equipment. It is an ideal process for the development of maintenance programmes for equipment of all types, especially complex equipment for which no service history is available. Applied to re-assess the maintenance requirements of existing equipment, RCM₁ can transform maintenance schedules and the way the maintenance function as a whole is perceived in the organization. The result is maintenance that is safer, more effective, less expensive and that is carried out with the agreement of production and maintenance personnel. Equipment is not overhauled or repaired periodically on a time or mileage basis, but at the point where reliability would suffer if no action were taken.

The cost and quality objectives of organisations cannot be met fully unless there is a planned move away from pure reliance on routine maintenance and towards condition-based maintenance management. RCM₁ can only be implemented successfully if accurate and reliable methods of condition monitoring are put into place. Generally, these employ advanced electronics, sensors and transducers; computing and communications technology, often integrated into Remote Condition Monitoring (RCM₂) systems.

The underlying principles that bring these RCM₁ and RCM₂ together, within a (RCM)² concept [29], are:

- Combining qualitative knowledge, e.g. the results of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) [1], and quantitative information (statistical and condition assessment data) about the assets can improve their performance [24], by allowing prediction of failures. Achieving improvements over their inherent/designed reliability thus reduces their maintenance cost (overall or whole-life cycle cost reduction).
- The effectiveness of maintenance intervention is increased by employing advanced electronics, computers and communications technology to gather useful information and knowledge about resources, both human and asset condition, and providing these to operators, engineers and maintainers as appropriate.
- Pro-active condition-based maintenance implies more control over resources. RCM₂ has been developed with an emphasis on safety [20] and no “tool” exists for deciding optimal maintenance intervals [32]. To date, the quantitative approach to RCM₂ has taken a back seat to the qualitative. This is because of the unavailability of plant-specific historic data and appropriate statistical methods to interpret the data [3].

The teams at the University of Sheffield (UK) and University of Castilla-La Mancha (Spain) have studied the application of remote condition monitoring to point mechanisms and their

operation, and have identified algorithms which may be used to identify incipient failure. The members of the team used a fault tree type analysis implemented in Matlab to detect points failure conditions.

1.3 Point mechanism description

As part of a guided transportation system, a train can move from one track to another only certain places, that is, where an appropriate mechanical device has been installed. This device is known as a turnout. The turnout has moving parts which are called switches (US: blades) and which steer the trains in one of two directions, normal (straight through) or reverse. The switches move from normal to reverse or reverse to normal direction. Turnouts are perhaps the most important infrastructure elements of the railway system and affect its safety greatly. The Potters Bar accident of 10 May 2002 in England was caused by a faulty turnout while the consequences of the Eschede accident in Germany were aggravated by a point moving underneath the train.

The 55 % of railway infrastructure component failures on high speed lines are due to signalling equipment and turnouts [28], where “signalling equipment” covers signals, track circuits, interlockings, automatic train protection (ATP) or LZB (track loop based ATP), and the traffic control centre. From another point of view, the annual cost of maintaining points is high, about UKP (United Kingdom Pound) 3.4 million per year for about 1000 km of railway, compared to other infrastructure elements. TC-TCR trade circuits, for example, cost UKP 2.1 million per year for the same area. Of the points expenditure, UKP 1.2 million is for clamp lock (hydraulic) turnout and UKP 1.4 million for electrically operated turnouts (data provided by a British asset manager). Turnouts can also be used to implement flank protection for a train route allocated to another train. This is achieved by positioning the blades of the turnout in such a way that a train driving through the turnout is not directed into a track segment belonging to the route of the other train.

The two safe positions of the moving parts of a turnout, normal and reverse, are generally detected using switches operated by the blades or their operating mechanisms. In order to ensure high availability and reliable and safe operation, points require regular inspection and maintenance. Currently, such maintenance is carried out on a time basis with allowance being made for the operational criticality of a particular point. A better and more cost-effective approach though is Reliability Centred Maintenance which is being adopted by a number of railway undertakings for point mechanism maintenance.

Most standard point machines for main line railways contain a switch actuating mechanism and a locking system which includes a hand-throw lever and a selector lever to allow operation by power or hand. The mechanism is normally divided into several major subsystems: the motor

unit which may include a contactor control arrangement and a terminal area, a gearbox comprising spur-gears and a worm reduction unit with overload clutch, a dual control mechanism as well as a controller subsystem with motor cut-off and detection contacts. Generally, there are also mechanical linkages for detection and locking of the point. The standard railway point is therefore a complex electro-mechanical device with many potential failure modes.

Operation of the motor/hand selector lever to the hand position, opens the motor supply circuit, disengages the drive from the motor and gearbox and engages the hand throw bevel drive. Interlocking selector and hand-throw levers can be arranged to ensure that the mechanism and points are returned to their original position before the power drive can be re-engaged. All these features add further complexity, albeit for very good reasons.

The circuit controller includes detection switches and a pair of snap-action switches to stop the machine at the end of its stroke and to brake the motor electrically so that the mechanism is not subjected to impact loading. The detection switches have high pressure wiping contacts made of silver/cadmium oxide or gold and they are operated by both the lockbox and the detection rod. The detection switches have additional contacts to allow mid-stroke short circuiting of the detection relays to avoid wrong indications in the signal box or electronic interlocking controlling the points.

In the case of DC operation, the motor is a special heavy-duty design, developed specifically for point machine use. The motor can take two basic forms, series-wound split-field and permanent magnet field for AC immune machines. Where the machine is operated on AC supplies, a silicon bridge rectifier is built into the machine. AC point machines are used by some manufacturers and railway infrastructure controllers.

Extensive use of self-lubricating and dry-lubricated bearings throughout the point machine reduces the necessity for frequent maintenance visits associated with lubrication. All gear teeth, sliding surfaces and pivots are fully lubricated with molybdenum disulphide grease before delivery.

1.4 Faults analysis

Many different types of faults have the potential to affect the correct operation of a set of points. Some faults are serious and require immediate attention, while others may safely be dealt with during routine maintenance. The possibility of a fault developing in a point mechanism depends on a large number of factors. Some of these factors and fault conditions are summarised in Figure 1.1.

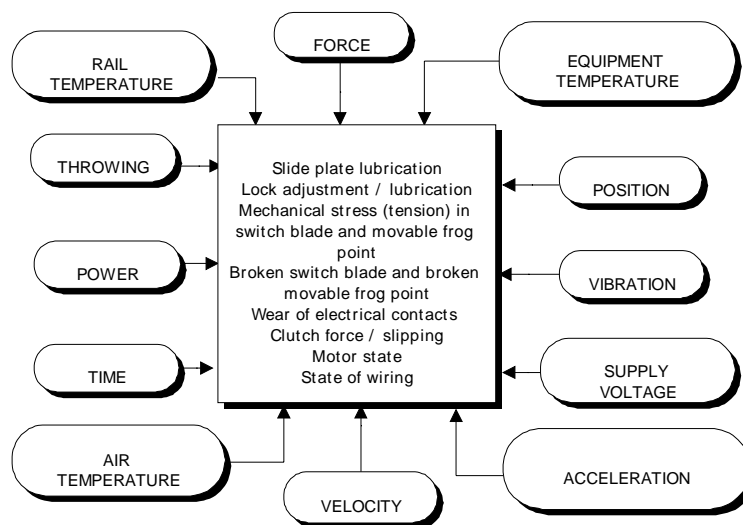


Figure 1.1.- Factors influencing fault levels in point mechanisms

To detect these faults, a robust monitoring system must be put in place. Figure 1.2 shows a comprehensive monitoring system used in the development of fault detection criteria. This is similar to the system used in research work carried out for the Tokaido Shinkansen of the Central Japan Railway Company as part of their CTC and Computerised Traffic Control System (COMTRAC) [32]. They studied the operation of electric point machines using an intelligent monitoring system in order to predict problems and to enable a quick recovery. Three kinds of sensors were employed: a current sensor, a throwing load sensor and a switch position sensor. The throwing load sensor measured the stress in the operating rod of the electric point machine. This is directly related to the operating force. The throwing load can increase because of a lack of lubrication, changes in weather or inadequate adjustment, or if there are obstacles between the point blade and stock rail. The current sensor measures the operating current of the induction motor installed in the electric point machine. Current information is useful in detecting an increase in the throwing load because the operating current of any motor, including induction motors, is affected by load torque. If the current increases significantly while the force stays the same this indicates a problem in the electric parts of the drive or in the gearbox. This characteristic was also used by the team at Sheffield.

Using similar approaches to monitor the British HW point machine, the motor current is measured using non-intrusive current transformers mounted within the point machine housing. The current transformers are torroidal coils through which the common return wire from the motor passes. The cable to the connection box is routed through a spare cable gland, together with the cables from the positional sensors.

The force in the drive bar is measured with a load pin. This is inserted in place of the bolted connection between the drive bar and the drive rod. This component carries Railtrack approval and can thus be used on points, which are in service.

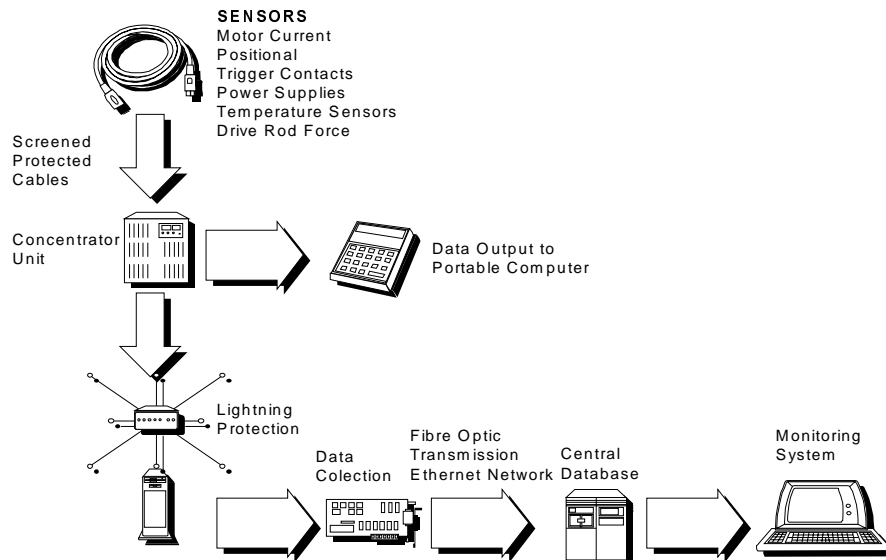


Figure 1.2.- A basic monitoring system

1.5 Model for detecting Faults

Normally, in condition based maintenance, a condition reading is acquired in real time and analysed as quickly as possible. Thus, it is very important that a model is established for the optimal critical levels in condition based maintenance in terms of a criterion of interest. Obviously, the determination of the critical level and the monitoring interval will influence the success of condition based maintenance. Consequently, a statistical family cannot be evaluated for studying the real curve, as the data has to be analysed in real time. The basic principle of the approach relies on knowledge of the initial behaviour and the subsequent time history. In the following text we use the term “signal” and “curve” for data collected from a point mechanism.

476 experiments (points moves or attempted point moves) were carried out while collecting time, force and operating current data. The data from the point mechanism is initially classified in terms of direction of movement, i.e., either reverse to normal direction or normal to reverse direction. For both directions, faults have been detected with “current (A) vs. time (s)” curves and “force (N) vs. (s)” curves. It was observed that “current (A) vs. time (s)” curves are not the best choice for detecting faults in point mechanisms. The final classification of faults employs only the magnitude and the moment when they change with respect to the reference curves. This classification was the basic information for programming the fault tree analysis in Matlab.

For detecting faults in point mechanisms, we must employ a model that can determine the dynamic character of the system. For instance, the reference signals or curves for detecting faults depend on the environmental conditions (temperature, humidity, etc.), and on the in service time of the system, because the friction forces are larger at the beginning than once the system has worn in. In the experiment were employed 79 curves for the reverse to normal direction, including 4 curves “as commissioned”, and 72 curves for the normal to reverse direction, with 3 curves “as commissioned”. However, one of the “as commissioned” curves in the reverse to normal direction was not included in the evaluation since have been generated at a late stage in the test. The ‘x’ axis is the time (s) and ‘y’ axis is force (N). A reference dynamic system has to be applied to all of these variables.

The first conclusion after studying these curves is that we can detect only a few faults by analysing the signal directly but, if we analyse the differences between the current data x^j and the reference data x^i in the form of absolute values $d^j(1)$, we can detect the majority of faults as they develop.

$$d_t^j = |x_t^j - x_t^i|, \quad \forall t \quad (1.1)$$

The ‘x’ axis is again time [s] and the ‘y’ axis is the difference between the dynamic mean geometric and the current curve as an absolute value [N].

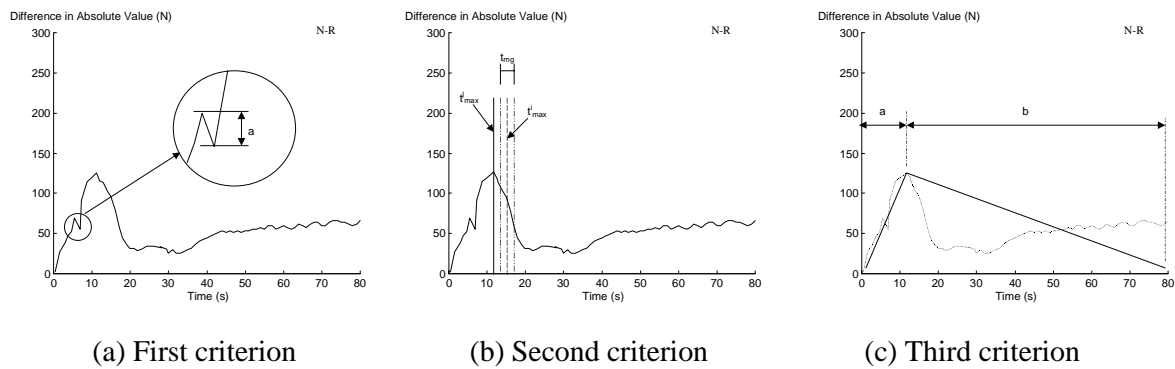


Figure 1.3.- Criteria employed for detecting faults in point mechanism

The irregularity in the curve shape, i.e. the difference between the reference and the current curves, is a result of noise in the measurement. It is for this reason that faults detected at the beginning of monitoring are not real faults. The new signal that is to be studied must be analysed data point by data point. In order to detect a failure in real time, suitable criteria have to be designed for detecting faults. Three criteria have been considered for this model:

- i) Irregularities in the curve shape.
- ii) Deviation of maximum value position from that of signatures without faults.
- iii) Signature symmetry with respect to the maximum value position.

1.5.1 First Criterion: Irregularities in the Signal Shape

Studying the reference curves without faults, we can see that they are both symmetric with respect to the position of the maximum value, although their amplitudes are different. It must be noted that one “as commissioned” curve has a difference of zero from the reference value and is therefore co-incident with the x-axis. The irregularity in these curves requires the application of a sensitivity value for perturbations in the signal.

1.5.2 Second criterion: Deviation of maximum value position of the curves

In general, the second criterion is based on equation (1.2), where new data indicates a failure if:

$$t_{\max}^j \notin [t_{\max}^i - t_{mg}, t_{\max}^i + t_{mg}] \quad (1.2)$$

where

t_{\max}^j	Maximum time of current data
t_{\max}^i	Maximum time of reference data
t_{mg}	Time margin

The third criterion for detecting faults involves filtering the curves that are not symmetrical with respect to the maximum value position. It is observed that some curves are not symmetrical with respect to the maximum value position.

1.5.3 Third Criterion: Signature symmetry with respect to the maximum value position

Assuming that the curve areas on both sides of the maximum value position equate to triangles, we measure the areas of both triangles independently and compare their base relationships. This assumption has been demonstrated to be acceptable through numerous simulations and experiments.

$$\left(\frac{t_{\max}^j}{T^j - t_{\max}^j} \right) \cdot \sum_{n=0}^{n=t_{\max}^j} d_n^j \approx \sum_{m=t_{\max}^j}^{m=T^j} d_m^j, \quad (1.3)$$

where t_{\max} and T^j are the maximum value position and total time, $\frac{t_{\max}^j}{T^j - t_{\max}^j}$ is the area relationship, $\sum_{n=0}^{n=t_{\max}^j} d_n^j$ and $\sum_{m=t_{\max}^j}^{m=T^j} d_m^j$ are the areas under and above t_{\max}^j in the j current signal of d .

Although using these criteria has allowed a significant improvement in detecting faults by analysing changes from data set to data set, sensitivity values can be applied for further

improvement. This involves the application of a Kalman Filter [21] to pre-process the information collected from the mechanism.

1.6 Kalman Filter

A Kalman Filter estimates new system states based on the most recent actual values to determine new predictions. For detecting faults, a Kalman Filter application therefore has to be carried out during the data acquisition process to provide the information for the online application of the three criteria, increasing the system reliability. A Kalman Filter is an optimal recursive data processing algorithm, which is given in the form of a set of equations that allows an estimate to be updated once a new observation becomes available.

In the seminal paper, Kalman (1960) [21], a recursive solution is applied to the discrete data linear filtering problem. There are several applications in maintenance, for example, W. Wang, in 1999, [35] used a random coefficient growth model to describe the deterioration process of the item being monitored. Once this model has been established, we can proceed to the decision model that is the primary purpose of the present paper. Another Kalman Filter application to maintenance is Christer (1997) [3], that used the filter in an application of a state space model to predict the degree of erosion of the inductors in an induction furnace. A measure of the conductance ratio is used to assess indirectly the relative condition of the inductors and to guide maintenance and replacement decisions. There is a large amount of basic literature about the Kalman Filter approach that explains this algorithm, i.e. [2], [19], [23] and [21].

However, there are not many references where a Kalman Filter approach has been developed to solve problems relating to condition monitoring systems. We could find only a few references covering this area of interest (i.e. [18], [30] and [31]). For the present study, we have therefore used a Kalman Filter to detect faults in point mechanism with good results.

1.7 Thesis layout

Chapter 2 is devoted to the general framework in which this thesis is rooted. In particular, some basic transport concepts are explained; the historic evolution of railway systems in Western countries is briefly described; and finally the Spanish legislation on this important matter is explained in greater depth. These laws started with the “Ley General de Ferrocarriles”, published in 1877, and finishes with the current “Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres” (1987; LOTT). This latter law is described in detail because of its importance nowadays, especially titles I and VI. This law, and of course the previous laws, has been one of the main reasons for developing the transport investment policies in Spain. Such policies are also described in this chapter with an specific mention to the policies carried out in Castilla-La

Mancha. The chapter concludes with the current state of railway transports in the European Union.

In Chapter 3 the most important changes and improvements carried out in railway transport from the treaty IV of Roma until today are synthesised, with an special reference to the technical aspects, laws, and above all the safety of the railway infrastructure. Safety depends mainly on the different elements that the infrastructure is composed of, where one of the most important elements are the turnouts (or switches). The configuration of turnouts as well as their evolution from 1796 until today are described, highlighting their most important corrections in order to update to the increasing requirements as time passes by. The chapter finishes telling about the market of the turnouts in Spain, from the point of view of demand and supply.

Chapter 4 concentrates on RCM². It is based in the integration of two other types of maintenance techniques, namely Reliability-Centred Maintenance (RCM₁) and Remote Condition Monitoring (RCM₂). The overall aim is to combine advanced electronics, control, computing and communication technologies to address the multiple objectives of cost effectiveness, improved quality, reliability and services. At the end of the chapter a detailed application of RCM² to railway transport is performed. In addition, other general topics are mentioned in this chapter (like availability, maintainability, maintenance, etc.) which are necessary for understanding the RCM² concept.

Chapter 5 describes the hardware and software employed for the data acquisition, transmission and management of the experiments, as well as the main components of the point mechanism utilised. The data are treated and monitored by an intelligent software employed for detecting different faults produced in the mechanism. Despite the automatic set up it also can be manipulated by the operator or the system in certain moments that are required, like stopping the mechanism or establishing a preventive policy. This software was developed in MATLAB[®] and it is based on the three criteria mentioned in earlier chapters and in this introduction, namely:

- Irregularities in curve shapes.
- Deviation of maximum value position from that of signature without faults.
- Signature symmetry with respect of the maximum.

This chapter also shows how the State Space formulation of linear systems and the use of the recursive algorithms, like the well-known Kalman Filter and related algorithms, may be used to increase the sensitivity of the model and to detect more faults and faster.

In Chapter 6 the main results and conclusions are summarised.

In order to meet the current legislation requirements about European thesis, this introduction, as well as the conclusion chapter (Chapter 6) are written in English, while the rest of chapters are written in Spanish. Nevertheless, most of the contents in the Spanish chapters may be read in English in the papers that this thesis has originated in the open literature, i.e. [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17] and [27].

References

- [1] British Standard BS 5760, *Reliability of System, Equipment and Components: Part 5: Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)*, 1991.
- [2] Chang-Ching L., Hsu-Pin W., Performance Analysis of Rotating Machinery Using Enhanced Cerebellar Model Articulation Controller (E-CMAC) Neural Networks, *Computers Industrial Engineering*, 30(2): 227-242, 1996.
- [3] Christer, A.H., Wang, W. and Sharp, J.M. 1997. *A State Space Condition Monitoring Model for Furnace Erosion Prediction and Replacement*, *European Journal Operational Research*, num, 101, pp. 1-14.
- [4] Fararooy S, Allan J, Abed SK, Lehrasad-Khan N. Condition monitoring of railway equipment: Experiencies from case studies. The 9th International Congress on Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management: COMADEM'96, Sheffield, Rail Sessions Supplementary Proceedings 1996.
- [5] Fararooy S, Allan, J. Condition-based maintenance of railway signalling equipment, electric railway in a united europe: Railink'95. IEE Conf. Pub. 1995; 405: 33-37
- [6] **García Márquez, F. P.**, Schmid, F. and Conde J. *Wear Assessment Employing Remote Condition Monitoring: A Case Study*. *Wear of Materials*, Washington DC, EEUU, del 30 de marzo al 3 de Abril de 2003, ref. [O201].
- [7] **García Márquez, F.P.** , Schmid, F. and Conde J. *RCM² Aplicado a Sistemas Automáticos de Accionamiento de Agujas en Vías de Alta Velocidad*. "Mantenimiento. Ingeniería Industrial y de Edificios", nº 167 Septiembre, 2003, pp. 20-26, en prensa.
- [8] **García Márquez, F.P.** y Laguna, M. *Optimización: Conceptos Básicos y Tendencias Actuales*. AconteSer, editada por Dimexa, Diciembre 2001, Año V Número 9, pp. 24-25.
- [9] **García Márquez, F.P.**, Pedregal Tercero, D.J., and Schmid, F. *Inversiones en el Sector del Transporte Ferroviario en la UE y su Influencia en el Mercado de los Desvíos Ferroviarios*, "Investigaciones Económicas", en revisión.
- [10] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *A Reliability Centered Approach to Remote Condition Monitoring. A Railway Points Case Study*. "Reliability Engineering and System Safety", Volume/Issue 80/1, pp. 33-40, 2003.
- [11] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *A Theoretical Model for Detecting Faults in Point Mechanisms Employing Kalman Filter*. "Operation Research", en revisión.
- [12] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *El Filtro de Kalman como Herramienta de Mejora de la Seguridad y Fiabilidad del Transporte Ferroviario*. "Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica", en revisión.
- [13] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Kalman Filter Approach for Increasing the Reliability and Safety to Remote Condition Monitoring. A Case Study*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering. Part. F. Journal of Rail and Rapid Transit*, en revisión.

- [14] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Management of Railway Infrastructure Maintenance. A case Study on Condition Monitoring of Point Mechanisms*. "Transportation Science", en revisión.
- [15] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad y Monitorización Remota Basada en la Condición, RCM²: Un caso de Estudio*, "Ingeniería y Gestión de Mantenimiento", nº 26 Noviembre/Diciembre, 2002, pp. 35-41.
- [16] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Modelo de Detección de Fallos Empleado en la Monitorización Remota Basada en la Condición*. "Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica", en prensa.
- [17] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Wear Assessment Employing Remote Condition Monitoring: A Case Study*. "Wear", nº 255, 2003, pp. 1209-1220.
- [18] Gelb A., Applied Optimal Estimation, MIT Press Cambridge MA, 1974.
- [19] Jacobs O. L. R., Introduction to Control Theory, Second Edition, Oxford University Press, 1993.
- [20] Jardine, A.K.S., Joseph, T., Banjevic, D. 1999. *Optimising Condition-Based Maintenance Decisions for Equipment Subject to Vibration Monitoring*, Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 5 num. 3, pp. 192-202
- [21] Kalman, R.E. 1960. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transaction of the ASME - Journal of Basic Engineering, pp. 35-45.
- [22] Kennedy A. Risk Management and Assessment for Rolling Stock Safety Cases. Proc Instn Mech Engrs Part F 1997; 211, p. 67-72.
- [23] Maybeck, P. S., Stochastic Models, Estimation and Control, vol. 1, Academic Press Inc., 1979.
- [24] Military Standard (MIL-STD-1629A), *Procedures for Performing a Failure Mode Effects & Criticality Analysis*, 1983
- [25] Mirabadi A., Schmid F., Fault Tolerant Train Navigation System Using Multisensor Integration Methods, Proceedings of the WCRR' 99 Conference, 19-23 October, Tokyo, 1999.
- [26] Nowlan, F., Stanley and Howard F.H. 1978. *Reliability-Centered Maintenance*, Department of Defence (AD-AO66579), Washington, D.C.
- [27] Pedregal Tercero, D.J., **García Márquez, F. P.**, Schmid, F. *RCM² Predictive Maintenance Of Railway Systems Based on Unobserved Components Models*. "Reliability Engineering and System Safety", Vol. 83, Num. 1, pp. 103-110.
- [28] REMAIN Consortium, Modular System for Reliability and Maintainability Management in European Rail Transport, Final Report, IITB, 1998.
- [29] Roberts, C. and Fararooy, S. 1998. *Remote Condition Monitoring into the next millennium*. Proceedings of Computer Aided Design. Manufacture and Operation in Railway.
- [30] Sarma V. V. S., Kunhikrishanan K. V. and Ramchand K., A Decision Theory Model for Health Monitoring of Aeroengine, J. Aircraft, 16: 222-224, 1978.

- [31] Sherwin D.J., Basim Al-Najjar, Practical Models for Condition Monitoring Inspection Intervals, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 5(3): 203-221, 1999.
- [32] Shimonae, T., Kawakami, T., Miki, H., Matsuda, O. and Tekeuchi, H. 1991. *Development of a Monitoring System for Electric Point Machines*, IRSE Aspect Int. Conf., pp. 395-401.
- [33] Steen R. 2002. UK Train Derails, Six Dead, dozens Injured. Worldwide Disaster Aid and Information Via the Internet. <http://www.disasterrelief.org/Disasters/020510uktrain>
- [34] Stott, P.F. 1987. *Automatic Open Level Crossing a Review of Safety*, Her Majesty's Stationery Office, London (UK).
- [35] Wang, W. 1999. *A Model to Determine the Optimal Critical Level and the Monitoring in Condition Based Maintenance*, Technical Report CMS-99-07.
- [36] Yazdi H., Roberts C. and Fararooy S. Intelligent condition monitoring of railway signalling equipment using simulation, IEE Seminar – Condition Monitoring for Railway Transport, Birmingham, November 1998.

2 Evolución del Transporte Ferroviario

En el presente capítulo se muestran los conceptos básicos relacionados con el transporte. Seguidamente se describe la evolución del ferrocarril a lo largo de la historia en Occidente. Asimismo se repasa la evolución relativa a la legislación del ferrocarril en España, partiendo de la La ley General de Ferrocarriles de 23 de noviembre de 1877, y concluyendo con la actual Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres, de 30 de julio de 1987, conocida como LOTT. En esta última, la LOTT, se describen los títulos de los que consta dicha ley, con especial atención a los que hacen referencia al transporte ferroviario, como son el título I y VI. Esta ley, así como las anteriores, ha sido uno de los principales factores para determinar las distintas políticas de inversión en España. En este capítulo se detallan dichas políticas, haciendo especial mención a las políticas llevadas a cabo en la Comunidad de Castilla-La Mancha. El capítulo concluye describiendo la situación actual de los sistemas de transportes en la Unión Europea, y más detalladamente el transporte ferroviario.

Índice de contenidos

2	Evolución del Transporte Ferroviario	21
2.1	Conceptos básicos	25
2.2	Historia del ferrocarril en el ámbito internacional.....	25
2.3	Legislación relativa al ferrocarril en España	29
2.3.1	Introducción.....	29
2.3.2	Ley Ordenación del Transporte Terrestre.....	31
2.4	Políticas de inversión en el transporte en España.....	36
2.5	Antecedentes en el desarrollo del transporte ferroviario en la Unión Europea.	43
2.6	Crecimiento y desarrollo del sistema ferroviario en la Unión Europea	46
	Referencias.....	49

Índice de figuras

Figura 2.1.- Inauguración de la línea de ferrocarril de Stockton-Darlington (27 de septiembre de 1825).....	26
Figura 2.2.- Locomotora empleada en el primer trayecto español de ferrocarril, La Habana-Güines.....	27
Figura 2.3.- Primera locomotora de vapor, llamada South Wales (1803)	28
Figura 2.4.- Distribución de operaciones en España del sector transportes.....	39
Figura 2.5.- Tren de alta velocidad desarrollado en España.....	39
Figura 2.6.- Actuación en la red ferroviaria de Alta Velocidad en la Comunidad de Castilla-La Mancha	41
Figura 2.7.- Red Europea de Alta Velocidad y Velocidad Alta para el año 2010.....	44

Índice de tablas

Tabla 2.1.- Distribución económica de las operaciones del grupo fomento por políticas para el año 2002.....	37
Tabla 2.2.- Operaciones de capital del Grupo Fomento para el año 2002.....	38
Tabla 2.3.- Distribución del presupuesto de inversión del Ministerio de Fomento en la Comunidad de Castilla-La Mancha para el año 2002.....	40
Tabla 2.4.- Presupuestos de inversión regionalizada Ministerio de Fomento para 2002 en la Comunidad de Castilla-La Mancha	42
Tabla 2.5.- Presupuestos de inversión regionalizada por entidades del Grupo Fomento para 2002 en la Comunidad de Castilla-La Mancha	42

2.1 Conceptos básicos

Se entiende por transporte a la conducción de un objeto o persona de un lugar a otro. El transporte, como actividad económica, consiste en dominar el espacio y el tiempo trasladando mercancías, personas o información de un lugar a otro. Desde un punto de vista de la producción, el transporte ostenta una doble función, una primera de naturaleza política, encaminada a la integración social y mejora de la calidad de la vida, y otra económica, dirigida a conexionar los sistemas productivos y de consumo y dotar de accesibilidad al territorio [1].

Los objetivos principales del transporte son la búsqueda del bienestar social, rentabilidad social, integración social, la mejora de la utilidad de los recursos y la búsqueda de la rentabilidad puramente económica.

Los distintos sistemas de transportes tienen un gran peso en las macromagnitudes de cada país. Así, por ejemplo, en España, desde el punto de vista del consumo energético, el 43 % corresponde al transporte, siendo dicho porcentaje en la CEE del 32 %. La participación de éste en el valor añadido bruto a precio de mercado (VAB_{pm}) de España ha sido del 4 %, aproximadamente, en estos últimos años.

2.2 Historia del ferrocarril en el ámbito internacional

A finales del siglo XVIII las cuencas carboníferas británicas tenían varias millas de vías por las cuales los vagones circulaban, impulsados por la fuerza de la gravedad, por animales de tiro o por personas. La inauguración de la línea Stockton-Darlington en 1825 fue el prelude del comienzo del ferrocarril (ver Figura 2.1). En 1830 se inauguró el primer ferrocarril diseñado específicamente para la locomoción de vapor como transporte común, en el trayecto Liverpool-Manchester (Inglaterra). A partir de entonces, la red de ferrocarril británica se desarrolló con rapidez. Gran Bretaña tenía por entonces la experiencia técnica y las reservas de capital necesarias para su construcción y desarrollo, favorecido por la realización del Parlamento británico de distintas concesiones a sociedades anónimas privadas. En 1850 se habían construido más de un 25 % de su futura red ferroviaria, casi tanto como el resto de Europa en su conjunto.



Figura 2.1.- Inauguración de la línea de ferrocarril de Stockton-Darlington (27 de septiembre de 1825)

En 1830 países como Francia, Austria y los Estados Unidos tenían ferrocarriles de trayecto corto impulsados por caballos. En el caso concreto de Francia, se construyeron los primeros kilómetros de ferrocarril de vapor. El país donde más se desarrolló sufrió el ferrocarril fue Estados Unidos, aventajando a países como Gran Bretaña y rivalizando con toda Europa en su construcción. Esto se llevó a cabo gracias al capital invertido por los promotores privados, los gobiernos locales y estatales para poder cubrir las vastas distancias del país, así como a los grandes abastecedores europeos. Muchas de estas líneas fueron construcciones de calidad deficiente y no siguieron ningún patrón determinado.

En el ámbito Europeo, Bélgica fue el país que mejor planeó y construyó el ferrocarril. El gobierno decidió construir una extensa red a cargo del Estado para facilitar la exportación de las manufacturas belgas y hacerse con el comercio de tránsito del noroeste de Europa. El primer tramo, y primer ferrocarril totalmente de vapor en el continente, se inauguró en 1835. En 1845 se había terminado la red básica estatal. Los ramales y líneas secundarias fueron financiados por la empresa privada.

Hacia 1850, Francia y Alemania fueron las dos únicas naciones continentales que hicieron un progreso importante en el ferrocarril, realizándose con más éxito en Alemania. En 1835 se creó la primera línea en Alemania, Nuremberg-Fürth. La financiación del ferrocarril fue principalmente estatal, aunque en muchos casos fue a cargo de empresas privadas, pero con subvenciones estatales. En Francia la evolución del ferrocarril fue más lenta, debido a la discusión en el Parlamento acerca de la fuente de su financiación, estatal o privada. A partir de 1852 la construcción procedió con rapidez.

En los demás países Europeos el progreso del ferrocarril fue mínimo antes de mediados del siglo. El primer ferrocarril del imperio austriaco fue la línea Budweis-Linz (Bohemia), en 1820, impulsada por caballos. En 1836 el gobierno otorgó la concesión para el primer ferrocarril de vapor a una compañía privada, patrocinada por la familia Rothschild. A partir de 1842 el Estado

emprendió la construcción del ferrocarril por su cuenta. Esta política se vio interrumpida a consecuencia de las dificultades financieras de la siguiente década, pasando de nuevo su construcción a manos del sector privado. A mediados del siglo solamente funcionaban unos 170 kilómetros de ferrocarril, estatal y privado, casi en su totalidad concentrados en Bohemia y las regiones de habla alemana del imperio.

Los Países Bajos aceleraron la construcción a partir de finales de la década de 1830 y principio de la siguiente, lo que dio como resultado la conexión de las principales ciudades. Los resultados financieros no fueron los deseados, y el ferrocarril se vio desfavorecido. Hasta 1856, la red de ferrocarril no se comunicó con el resto de Europa.

En Italia, entre los decenios de 1830 y 1840, se habían construido algunos tramos ferroviarios cortos. Su construcción se vio perjudicada por la división que sufría la península, y no fue hasta 1850 cuando se impulsó su construcción. La evolución del ferrocarril Suiza y España siguió las mismas pautas. El 19 de noviembre de 1837 se inauguraba en Cuba el primer tramo del ferrocarril La Habana-Güines, cuya locomotora se muestra en la Figura 2.2, que era además el primero que se construía en España y también en toda Iberoamérica.

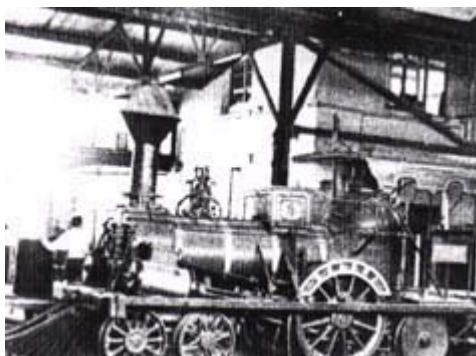


Figura 2.2.- Locomotora empleada en el primer trayecto español de ferrocarril, La Habana-Güines

En la U.R.S.S., tras conectar por vía férrea en 1838 la ciudad de San Petersburgo con el palacio imperial de verano del zar, ubicado a las afueras de la ciudad, no se construyeron más líneas hasta mediada la década de 1840. Entonces se emprendió, sobre todo por razones militares y por medio de préstamos del extranjero, las líneas básicas de San Petersburgo a las fronteras austriacas y prusianas. Sin embargo tan sólo se llegó a 1850 con un tramo corto en funcionamiento desde Varsovia hasta la frontera austriaca.

En los demás lugares del este y sur de Europa, ya fueran áreas dominadas por un emperador, zar o sultán, hacia 1850 ni siquiera se pensaba en el ferrocarril. Incluso en occidente, Dinamarca sólo estaba empezando a hacer proyectos, y tres países (Suecia Noruega y Portugal), no tenían ferrocarril ni proyectos.

La segunda mitad del siglo XIX fue la gran era de la construcción del ferrocarril en Europa y el resto del mundo. Los ingenieros británicos fueron los encargados de construir algunos de los primeros ferrocarriles del continente, debido a que eran los que tenían más experiencia. Posteriormente fueron los responsables de la mayor parte de la construcción en India, Hispanoamérica, África del Sur. Los norteamericanos construyeron su propio ferrocarril desde el principio, aunque con ayuda de capital y equipos europeos, básicamente británicos. Los franceses, basándose en la experiencia de los británicos, no sólo construyeron su propio ferrocarril, sino la mayoría de los del sur y este de Europa, incluida Rusia. Los alemanes también construyeron la mayoría de su ferrocarril, y algunos en el este de Europa y Asia.

Las primeras locomotoras, aunque maravillas en su día, eran en realidad bastante insignificantes (ver Figura 2.3). Las continuas mejoras en el diseño de las mismas dieron lugar a enormes máquinas a finales del siglo XIX y principios del XX, cuando los motores de tracción eléctrica y diesel habían empezado a disputar la primacía de las locomotoras de vapor. Los túneles atravesaron los Alpes ya en la década de 1870. Los coches cama, aunque se introdujeron en Estados Unidos en 1837, no se generalizaron en Europa hasta 1870, en que ya vías férreas continuas atravesaban las fronteras políticas con facilidad.

En las próximas secciones se describe el estado actual del ferrocarril en España desde el punto de vista legislativo, y se detallan las políticas de inversión que se están llevando a cabo.

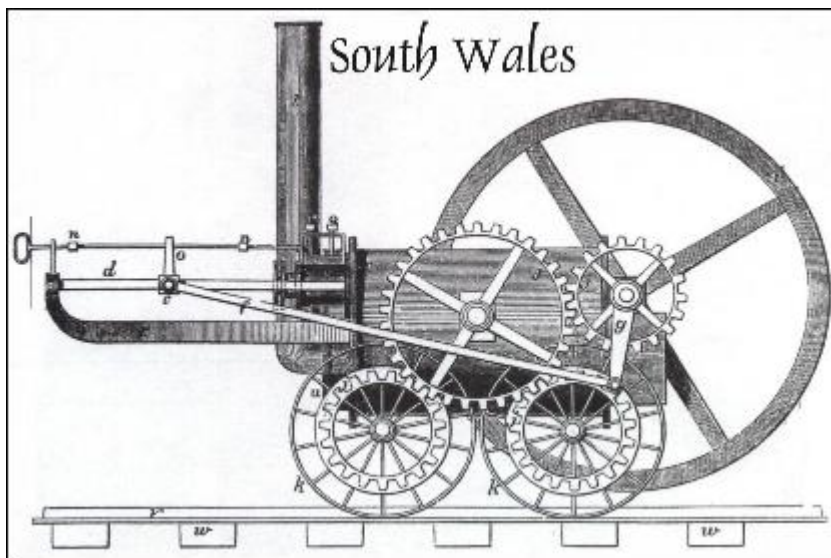


Figura 2.3.- Primera locomotora de vapor, llamada South Wales (1803)

2.3 Legislación relativa al ferrocarril en España

2.3.1 Introducción

El transporte ferroviario estaba regulado por la “Ley General de Ferrocarriles” de 23 de noviembre de 1877 [16], y la “Ley de Ferrocarriles Secundarios y Estratégicos” de 26 de marzo de 1908 [14], modificada por la ley de 23 de febrero de 1912 [15]. Dichas leyes habían visto reducido su ámbito efectivo de vigencia, a partir de las antiguas concesiones ferroviarias llevado a cabo por las antes citada Ley de 24 de enero de 1941, y su asignación a la Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles (RENFE) [5], que se creó por la misma ley para la gestión del servicio ferroviario de vía ancha en régimen de empresa pública estatal. Esta ley fue complementada, en cuanto a los ferrocarriles de vía estrecha, por otra empresa similar, FEVE [3], regulada hoy por el Decreto Ley 11/1972, de 29 de diciembre [4], aunque su origen viene dado por el Decreto Ley de 3 de julio de 1926.

La creación de las citadas empresas estatales supuso la introducción para los ferrocarriles explotados diferentes normas recogidas por el Estatuto, de principios muy diversos a los contenidos en las dos antiguas leyes aludidas, de ideología rígidamente liberal. No obstante, subsistía dicha legislación general en cuanto a los ferrocarriles que no fueron objeto de rescate en 1941, como son los ferrocarriles mineros y algunos de vía estrecha, como el ferrocarril que recorría la línea de Palma al Puerto del Soller, así como era aplicable a las peticiones de nuevas concesiones que, eventualmente, se presentaban por la iniciativa privada.

Pese a la prohibición de otorgamiento de líneas coincidentes con el ferrocarril, y la excepcionalidad con que en la Ley de Coordinación se dibujaban las dispensas de dicha regla, se crearon dichas líneas. Así pues, alrededor de un 80 % de las líneas regulares eran coincidentes con el ferrocarril, fenómeno que, a su vez, ha dado lugar al hecho de que RENFE sea el titular de entre los empresarios del sector de paquete de concesiones de líneas regulares de viajeros más importante por ejercicio de su derecho de tanteo. Como reflejo de toda esta situación, es significativa la evolución del parque de vehículos de transporte por ferrocarril, aún más llamativa si se contrasta con las cifras del parque de automóviles.

Las Leyes de la “Coordinación de los Transportes Mecánicos Terrestres” y “Ordenación de los Transportes Mecánicos por Carretera”, ambas leyes de 27 de diciembre de 1947 [6] y [7], dieron prioridad en gran medida al transporte ferroviario, por razones de ahorro energético y económicos de los recursos disponibles por entonces. Así, por ejemplo, se prohibió otorgar líneas regulares de viajeros o mercancías por carretera coincidentes con líneas del ferrocarril. Asimismo, para los casos excepcionales en que se otorgara líneas coincidentes, se atribuía el privilegio del derecho de tanteo a la empresa ferroviaria, y la imposición de un canon de coincidencia que habría que pagar a la empresa de ferrocarril la de transporte por carretera

coincidente. Todo ello enmarcado en el principio general, expresamente manifestado en la Exposición de Motivos de la Ley de Coordinación [6], de asignar al transporte por carretera una misión meramente complementaria y distribuidora del transporte ferroviario.

De otra parte, en la regulación específica del transporte por carretera, modificó las estrategias con respecto a la “Ley de Bases de Ordenación Ferroviaria y del Transporte por Carretera” [9], desistiendo de la previa elaboración y aprobación de un Plan Estatal de líneas de transporte, y confinando a la iniciativa privada la detección de las corrientes de tráfico necesitadas de atención.

Lo comentado en los párrafos anteriores ha fomentado que se haya modificado la legislación, unido a los siguientes factores: de una parte, la implantación del Estado de Autonomías, en el marco de la instauración del régimen democrático, y de otro lado, la integración española en la Comunidad Económica Europea.

En cuanto al primer aspecto, el artículo 149.1.21 de la Constitución de 1978 reserva al Estado únicamente la competencia exclusiva sobre los ferrocarriles y transportes terrestres que transcurran por el territorio de más de una Comunidad Autónoma. En el artículo 148.1.5 de la Constitución se establece la asunción de competencias por las Comunidades Autónomas respecto a aquellos ferrocarriles y carreteras cuyo itinerario se desarrolle íntegramente en el territorio de Comunidad Autónoma.

Aprobados, en dicha línea, los Estatutos de Autonomía de las diversas Comunidades, se ha llevado a término un importante proceso de transferencia de competencias a las mismas, en materia de transportes de ámbito regional, habiéndoles asimismo delegado otras sobre transportes interregionales, con la consiguiente necesidad de reajustar la legislación del sector.

Respecto a la integración a la Comunidad Económica Europea, si bien en líneas muy generales el Derecho Derivado Comunitario se refiere principalmente al transporte internacional y no requiere excesivos ajustes, en el Derecho Interno de España sí es necesario. Sin embargo, algunos Reglamentos o Directivas que afectan al transporte nacional requieren las correspondientes adaptaciones, especialmente en materia de acceso a la profesión de transportista y armonización de las condiciones de competencia.

Así pues, en 1987 se publicó la Ley Ordenación del Transporte Terrestre [10]. A continuación se describe dicha ley, la cual ha servido y sirve de referencia principal en la actual y futura evolución del sector de transporte en España.

2.3.2 Ley Ordenación del Transporte Terrestre

La “Ley de Ordenación del Transporte Terrestre”, de 30 de julio de 1987 (LOTT) [10], implicó una profunda transformación en cuanto a la filosofía y los principios de ordenación del transporte terrestre anteriormente vigentes, lo cual significa que las soluciones concretas a los distintos problemas de transporte terrestre que con anterioridad a la citada ley existían a nivel reglamentario, deban sufrir asimismo cambios muy importantes. A tal fin, en el reglamento vigente se lleva a cabo la concreción de los principios y reglas contenidas en las anteriores normas reglamentarias, realizándose una masiva derogación (que afecta a 182 Decretos y a 576 Órdenes) de las mismas.

En la redacción del reglamento no se ha seguido de forma absolutamente fiel la estructura formal de la ley desarrollada; ello se debe, fundamentalmente, a tres razones: a que existen preceptos legales susceptibles de consideración individualizada que no resultaba necesario desarrollar y que, por tanto, no se incluyen en el reglamento; a que se ha estimado conveniente en ocasiones agrupar cuestiones que, si bien se trataban en la ley separadamente, deben tener una regulación reglamentaria homogénea, y, por último, a que el desarrollo que el reglamento hace de determinados temas reclama, en ocasiones, una estructuración diferente.

Se ha pretendido que el reglamento tenga, sin perjuicio de su carácter ejecutivo de la ley, una sustantividad propia, realizando el tratamiento de las distintas cuestiones de forma completa y comprensible por sí misma. Por ello, si bien no se repiten, según se ha dicho, preceptos de la ley que no era preciso desarrollar y que no eran necesarios para la adecuada comprensión de los temas tratados, sí se incluyen preceptos tomados de la ley que resultan necesarios para dar una visión global de las materias reguladas.

El título I del reglamento comienza por la determinación de las reglas correspondientes a la aplicabilidad del mismo, estableciéndose al efecto que dicha aplicabilidad será en todo caso directa cuando se trate de transportes de competencia estatal, aunque las funciones ejecutivas sobre las mismas hayan sido delegadas a las Comunidades Autónomas. Es conveniente advertir que las regulaciones que se contienen a lo largo del articulado han de entenderse referidas primariamente a transportes de competencia estatal. Así pues, por lo que, salvo en algún caso excepcional justificado por razones concretas, las referencias orgánicas se realizan a órganos de la Administración del Estado, sin perjuicio de la aplicación, en principio supletoria, pero en algunos casos como, por ejemplo, en los relativos a la legislación mercantil o las condiciones de obtención de títulos profesionales o a cuestiones que hayan de considerarse como materias básicas reservadas, constitucionalmente a la competencia estatal (tales como la configuración básica del régimen concesional) - directa, a los transportes sobre los que ostenten competencia las Comunidades Autónomas. Todo ello de acuerdo con el propósito

expresado en el preámbulo de la LOTT de constituir, en cuanto ello resulte posible, un marco normativo homogéneo para el sistema común de transporte terrestre.

Se contienen asimismo en el título I, relativo a las disposiciones comunes a los distintos modos de transportes, preceptos referidos al cumplimiento del contrato de transportes. Se trata en estos preceptos de establecer las reglas complementarias necesarias para la solución de los problemas propios del contrato de transportes en la época actual, respetando siempre las normas del Código de Comercio.

También se incluyen en el título I las reglas sobre la tramitación, aprobación y efectos de los planes de transporte, dando en ellas una importante participación a las Comunidades Autónomas; las relativas al transporte realizado sucesivamente por varias empresas distintas; las que se refieren al régimen tarifario de los distintos tipos de transporte y actividades auxiliares y complementarias de éste; las que tratan de la participación de las asociaciones de cargadores y usuarios en las funciones administrativas; y las relativas al Consejo Nacional de Transportes Terrestres (CSTT) (art. 36 de la LOTT [10]). La composición del CSTT se estructura mediante la participación en el mismo de representantes de los cargadores, de los transportistas y de los demás sectores afectados.

En el título II se contienen las disposiciones comunes a los distintos tipos de transporte por carretera y a las actividades auxiliares y complementarias de éste.

En el título III, relativo a los transportes regulares de viajeros por carretera, se concretan las reglas para realizar el establecimiento de los mismos sobre la base de la exclusividad en la prestación, así como para realizar los concursos de adjudicación de las concesiones de su explotación que garanticen la concurrencia de las ofertas y la selección entre estas de la más favorable para el interés público.

En el título IV, dedicado a las actividades auxiliares y complementarias del transporte por carretera, se realiza una clarificación de la naturaleza de la intervención de las agencias de transporte de mercancías y de los ámbitos material y territorial a los que puede extenderse dicha intervención. Además se establecen los requisitos necesarios para el ejercicio de la actividad de agencia, previendo que no existan limitaciones cuantitativas al otorgamiento de autorizaciones para el mismo y sí, únicamente, condiciones de carácter cualitativo, distinguiéndose, respecto a éstas, las agencias de carga completa de las de carga fraccionada.

En el título V, relativo al régimen sancionador y de control, se especifican las conductas comprendidas en cada uno de los distintos tipos infractores relacionados en la LOTT como muy graves, graves y leves. Se establecen asimismo las condiciones esenciales de las concesiones y autorizaciones administrativas de los distintos tipos de transporte y de actividades auxiliares y

complementarias del mismo, a los efectos de la posible caducidad e imposición de sanciones que su vulneración implique. También se concretan las sanciones pecuniarias que las distintas infracciones implican, y las consecuencias de otro tipo, como son la retirada provisional o definitiva de autorizaciones y la paralización y precintado de vehículos.

El título VI está dedicado al establecimiento, construcción y explotación de transportes ferroviarios, regulándose en el mismo de forma separada la construcción de ferrocarriles y la explotación de los mismos.

Por lo que se refiere al establecimiento de nuevas líneas ferroviarias, se determinan en el Reglamento las reglas que habrán de observarse para la elaboración del correspondiente proyecto, especificando el contenido del mismo y determinando el procedimiento para su tramitación y aprobación.

En cuanto a la construcción, se prevé que la misma pueda ser realizada por el Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones (actualmente Ministerio de Fomento) con cargo a los presupuestos que le corresponda administrar; por RENFE con cargo a los suyos; por las empresas privadas o mixtas a las que se les adjudique la construcción y posterior explotación de la línea; o bien mediante convenio específico del Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones o, en su caso, del Gobierno con otras Entidades públicas o privadas.

Por lo que se refiere a la construcción por el Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, la misma se realizará normalmente en forma indirecta llevándose a cabo la contratación de las obras mediante concurso, si bien se prevé que el Ministerio pueda contratar directamente la realización de las obras con RENFE [17].

Cuando la realización de las obras haya sido encomendada a RENFE con cargo a sus propios presupuestos de inversión, según lo previsto en el correspondiente contrato-programa de la misma con el Estado, la actividad de construcción se realizará con independencia presupuestaria y funcional de la de explotación de los servicios.

La construcción por empresas privadas o mixtas, a las que se les encomiende conjuntamente la posterior explotación del servicio, se realizará por la empresa a la que se adjudique la correspondiente concesión administrativa de construcción y explotación, realizándose normalmente dicha adjudicación mediante concurso. Se prevé, no obstante, la utilización de los demás procedimientos de explotación indirecta previstos en la legislación de contratación administrativa y, expresamente, la contratación directa con empresas mixtas en las que participen la propia Administración o RENFE, cuando existan razones especiales que lo justifiquen. A tal efecto se regulan las condiciones de adjudicación del correspondiente

concurso y se determinan las reglas de extinción de las concesiones, las cuales no podrán tener una duración superior a noventa y nueve años.

En cuanto a la construcción mediante convenio específico con Entidades públicas o privadas, se trata de una fórmula que, no obstante el carácter especial con el que expresamente se establece, puede tener gran importancia práctica en las futuras líneas ferroviarias a construir, ya que la misma puede permitir, siempre previa justificación de su procedencia, fórmulas variadas, tales como la participación de una empresa privada o mixta en la construcción, a cambio de un canon sobre los ingresos o los resultados de la posterior explotación.

Por lo que se refiere a la explotación ferroviaria, se prevé que la misma pueda realizarse bien por RENFE (lo cual será preceptivo cuando se trate de líneas pertenecientes a la Red Nacional Integrada), bien por la empresa privada o mixta a la que se le adjudique la concesión de explotación. Esta adjudicación normalmente se realizará mediante concurso, si bien se prevé la posibilidad de utilizar las demás fórmulas de gestión indirecta previstas en la legislación de contratación administrativa y, especialmente, la contratación directa con empresas mixtas.

En la regulación de la explotación ferroviaria realizada por RENFE [17], teniendo en cuenta que en la base de la misma no existe una concesión que defina por sí misma la posición de la empresa explotadora, se han previsto diversas cuestiones relativas al régimen que RENFE habrá de seguir. Tales cuestiones son: la posibilidad de realizar las actividades complementarias que resulten necesarias o convenientes; las condiciones para cesar en la explotación de alguna línea o servicio; la posibilidad de realizar obras de mantenimiento y conservación de las líneas; la posibilidad de establecer por sí misma las tarifas a aplicar dentro de los límites en su caso establecidos por la Administración; la procedencia de realizar la explotación de forma tendente a lograr el equilibrio económico-financiero según lo previsto en el correspondiente contrato-programa; y la aplicabilidad general a la misma de las normas sobre derechos y obligaciones en las concesiones de explotaciones ferroviarias.

En la regulación de la explotación indirecta por medio de empresas privadas o mixtas, se determina que el plazo de las correspondientes concesiones no podrá ser superior a cincuenta años, y se establecen las reglas para la celebración y resolución de los concursos tendentes a su adjudicación. En cuanto a las condiciones conforme a las cuales deberá realizarse la explotación, se establece la sujeción de dicha explotación a los reglamentos de funcionamiento que apruebe el Ministerio de Transporte, Turismo y Comunicaciones, se realizan previsiones sobre la posibilidad de introducir modificaciones por parte de la empresa concesionaria, y se establecen de forma casuística los derechos y obligaciones de las empresas concesionarias.

Se cierra el título VI con la regulación de la construcción y explotación de ferrocarriles de transporte privado y apartaderos, determinándose las reglas que habrán de observarse para que la Administración autorice el establecimiento de los mismos, previniendo la posibilidad de utilización de terrenos de dominio público y determinando un régimen de libertad en la explotación por parte de la empresa autorizada. En relación con los apartaderos, la referida autorización se considerará otorgada por silencio administrativo si, en el plazo de un mes desde que se realice la solicitud, la Administración no se pronuncia sobre la misma.

En el título VII, relativo a la Política de Ferrocarriles, se establecen las reglas de conceptualización y delimitación de las zonas de dominio público, servidumbre y afección, que por estar inmediatas al ferrocarril están sujetas a una serie de limitaciones, en cuanto a las obras y actividades que se pueden realizar en las mismas. En la regulación de las referidas limitaciones, que lógicamente son más intensas en la zona de dominio público que en la servidumbre y en ésta que en la de afección, se establece la prohibición de realizar cualquier obra o actividad en la zona de dominio público, salvo casos excepcionales debidamente autorizados. En la zona de servidumbre se establece la prohibición de realizar edificaciones y reedificaciones, salvo casos excepcionales debidamente justificados en los que la empresa explotadora lo autorice, siendo la autorización de dicha empresa requisito asimismo necesario para realizar otras actividades susceptibles de afectar al ferrocarril. En la zona de afección se exige la autorización de dicha empresa ferroviaria para la realización de construcciones u otras actividades que puedan afectar al ferrocarril, permitiéndose expresamente los cultivos agrícolas.

En cuanto a la necesidad de obtener las referidas autorizaciones de la empresa explotadora de la línea para ejercitar actividades susceptibles de afectar al ferrocarril, se prevé la posibilidad de que los solicitantes puedan recurrir ante la Administración a fin de evitar que dicha autorización sea denegada por causas improcedentes.

Por lo que se refiere al régimen sancionador, se concreta la cuantía de las multas a imponer por los distintos tipos de vulneraciones de la legislación ferroviaria, dentro de los límites previstos en la LOTT, y se establece que la competencia para la imposición de las referidas sanciones corresponderá a la Dirección General de Transportes Terrestres, cuando se refieran a infracciones que hayan sido cometidas por las empresas explotadoras de los ferrocarriles, y a los Gobernadores civiles cuando correspondan a infracciones cometidas por usuarios o terceros en general.

Dentro de las disposiciones adicionales procede destacar las concreciones que se realizan respecto al régimen jurídico de los teleféricos, así como de los funiculares y de los ferrocarriles predominantemente urbanos; las previsiones de que todas las referencias que se realicen en el Reglamento a RENFE, excepto las relacionadas con la Red Nacional Integrada, hayan de

entenderse aplicables a FEVE [8] y, en su caso, a otras empresas públicas ferroviarias; y el mandato de adscripción a la Dirección General de Transportes Terrestres de los medios personales y materiales necesarios para la realización de las nuevas funciones que en el Reglamento se le encomiendan.

La legislación mencionada en la presente sección ha servido de referencia importante en las diferentes políticas de inversión llevadas a cabo en el país en el sector del transporte. En la siguiente sección se describen dichas políticas en el ámbito español, haciendo una mención especial a las correspondientes en la Comunidad de Castilla-La Mancha.

2.4 Políticas de inversión en el transporte en España

Las inversiones directas del Grupo Fomento en infraestructuras de transporte en el Presupuesto de 2002 ascienden a 9.726 millones de euros, que se corresponde con la cifra del Anexo de Inversiones de los Presupuestos del Departamento de Fomento.

El importe de las inversiones en Inmovilizado material e inmaterial en Ferrocarril en España asciende a 3.965,2 millones de euros, que junto con las inversiones financieras de RENFE (23,7 millones de euros), constituyen la inversión directa del Grupo Fomento, que coincide con el total de las operaciones de capital de esta política: 3.988,9 millones de euros.

Las inversiones directas de Carreteras realizadas por la Dirección General se elevan a 2.557,8 millones de euros, a las que hay que añadir las efectuadas por el Grupo Enausa (107,5 millones de euros, de los cuales 24,1 corresponden a inversiones financieras), los préstamos a promotores de infraestructuras de Carreteras (150,3 millones), y las transferencias de capital fuera del Grupo para financiar infraestructuras de esta naturaleza (81,7 millones de euros), para determinar el importe de 2.897,3 millones de euros de operaciones de capital de la política de Carreteras.

El importe de la inversión de AENA en aeropuertos y navegación aérea es de 2.002,7 millones de euros, la inversión de SENASA (6,0 millones de euros) y la del Programa 515.B Regulación y Supervisión de Aviación Civil (7,4 millones de euros), determina la cifra de inversión directa y de operaciones de capital del Grupo Fomento en esta política: 2.016,1 millones de euros.

La inversión del Ente Público Puertos del Estado y las 27 Autoridades Portuarias en Inmovilizado material e inmaterial se eleva a 708,2 millones de euros, a los que hay que añadir 11,5 millones de euros de inversión en inmovilizado financiero para determinar las operaciones de capital del Grupo Fomento en esta política: 719,7 millones de euros.

En la Tabla 2.1 se detalla la distribución económica de las operaciones del Grupo Fomento por políticas.

DISTRIBUCIÓN ECONÓMICA DE LAS OPERACIONES DEL GRUPO FOMENTO POR POLÍTICAS (Millones de Euros)							
POLÍTICAS	GASTOS CORRIENTES				OPERACIONES DE CAPITAL		TOTAL
	PERSONAL	EXPLOTACIÓN	FINACIEROS	TRANSFER. CORRIENTES	INVERSIÓN (*)	TRANSFER. DE CAPITAL	
FERROCARRIL	1.218,6	1.019,9	451,2	0,2	3.988,9	37,4	6.678,8
CARRETERAS	107,9	66,4	18,6	--	2.815,6	81,7	3.090,2
AEROPUERTOS	632,5	599,9	77,1	1,8	2.016,1	--	3.227,4
CORREOS	1.108,8	344,0	1,4	1,6	244,8	--	1.700,6
PUERTOS	198,4	141,4	16,1	--	718,7	--	1075,6
VIVIENDA	16,2	101,2	0,3	0,2	73,3	581,8 **	773,0
OTRAS POLÍTICAS	127,5	2.361,7	546,8	287,2	9.942,9	696,0	616,9
TOTAL	3.409,9	2.361,7	564,8	287,2	9.942,9	696,0	17.262,5

* Inmovilizado material, inmaterial y financiero

** Transferencias de capital programas Vivienda (583,6 millones) menos las transferencias de capital a SEPES (1,8 millones)

Tabla 2.1.- Distribución económica de las operaciones del grupo fomento por políticas para el año 2002

En el Tabla 2.2 se distribuyen por políticas las operaciones de capital del Grupo Fomento, que están constituidas por las inversiones directas en Inmovilizado material, inmaterial y financiero y las transferencias de capital concedidas por el Grupo. Sus cifras demuestran la

prioridad de las políticas de creación de infraestructuras de transporte en los Presupuestos Generales del Estado para el ejercicio 2002.

Inversiones en inmovilizado material, inmaterial y financiero y transferencias de capital concedidas fuera del Grupo Fomento (Millones de Euros)			
POLÍTICAS	Importe	%	%
FERROCARRIL	3.988,9	37,5	15,8
CARRETERAS	2.897,3	27,2	6,0
AEROPUERTOS	2.016,1	18,9	39,7
PUERTOS	719,7	6,8	27,7
VIVIENDA	665,1	6,2	1,1
CORREOS	244,8	2,3	21,6
OTRAS POLÍTICAS	117,0	1,1	13,8
TOTAL	10.638,9	100,0	16,4

Tabla 2.2.- Operaciones de capital del Grupo Fomento para el año 2002

El peso de las operaciones de las Entidades Públicas Empresariales y Sociedades Mercantiles dependientes del Ministerio de Fomento, un 73,2%, supera las dos terceras partes del total del grupo Fomento, debido al elevado volumen de recursos gestionados por RENFE (3.230,2 millones), AENA (3.285,4 millones), GIF (2.780,4 millones), Correos y Telégrafos S.A. (1.699,0 millones) y el Ente Público Puertos del Estado (1.075,6 millones). El Ministerio con una participación del 26,5% ocupa el segundo lugar y a continuación los tres Organismos Autónomos con un peso del 0,3%.

La distribución de los recursos entre gastos corrientes e inversiones es del 61,6% para inversiones y transferencias de capital y el 38,4% para gastos corrientes y transferencias corrientes. Si se computan como inversión las transferencias de capital del Estado a RENFE para el mantenimiento de la infraestructura ferroviaria (671,8 millones) las operaciones de capital alcanzarían el 65,5%.

Los gastos corrientes se concentran en las Entidades Públicas Empresariales y Sociedades Mercantiles dependientes del Ministerio de Fomento, con un peso del 91,1%,

localizándose fundamentalmente en RENFE, Correos y Telégrafos S.A., AENA y Puertos del Estado, y en segundo lugar se encuentra el Ministerio con un 8,3%.

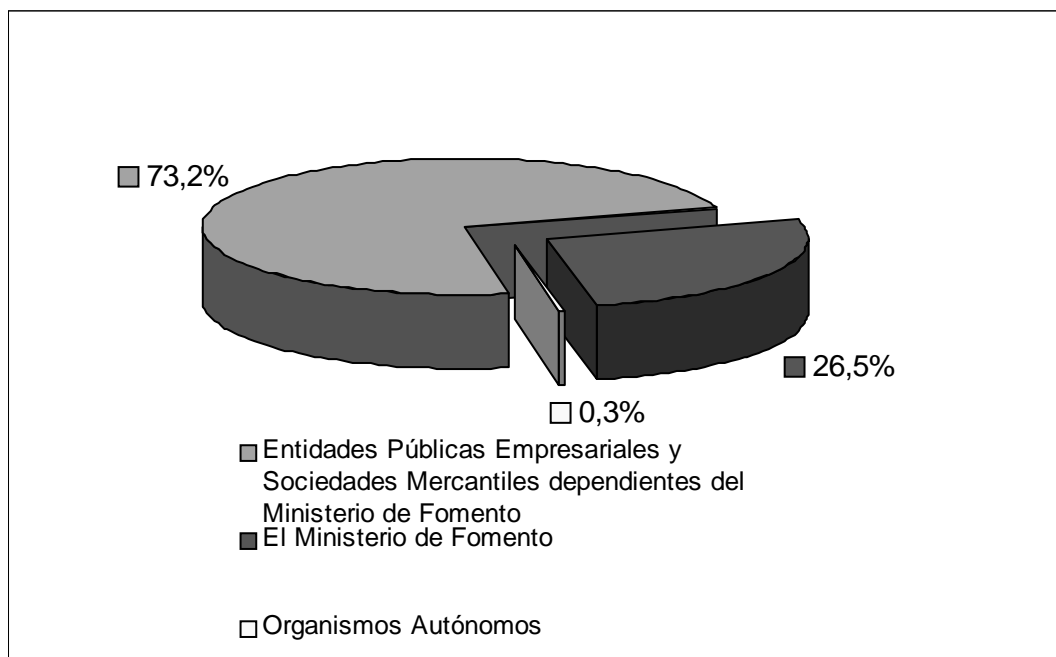


Figura 2.4.- Distribución de operaciones en España del sector transportes

Las Entidades Públicas Empresariales y Sociedades Mercantiles dependientes del Departamento son el principal agente inversor, con un 62,1% del volumen total de inversiones, concentrándose principalmente las inversiones en GIF, AENA, Puertos del Estado y RENFE y en segundo lugar el Ministerio con un 37,8%.

Así pues, el sector Ferroviario es el sector del transporte donde más se está invirtiendo en España actualmente (ver, por ejemplo, Tabla 2.1 y Tabla 2.2), favorecido principalmente por el interés de la Comunidad Europea en comunicar España y Portugal con el resto del continente mediante una red de ferrocarril de alta velocidad (ver Figura 2.5).



Figura 2.5.- Tren de alta velocidad desarrollado en España

La inversión en el Proyecto de Presupuestos Generales del Estado para 2002 en la Comunidad de Castilla-La Mancha, prevista por el Ministerio de Fomento y las Entidades Empresariales de él dependientes asciende a la cantidad de 274.595 miles de Euros, distribuidos según muestra la Tabla 2.3.

En la Figura 2.6 se representan las distintas actuaciones en las infraestructuras ferroviarias en la Comunidad de Castilla-La Mancha que está llevando a cabo el Ministerio de Fomento (actualizado a fecha de diciembre de 2001).

DIRECCIÓN GENERAL DE FERROCARRILES (Cantidades en Miles de Euros)			
ALBACETE	Renovaciones de vía en instalaciones	109	
	Acondicionamientos alta velocidad Albacete-La Encina	17.685	
	Mantenimiento especial (Línea Albacete-Alcázar)	2.127	
CIUDAD REAL	Mantenimiento especial (Línea Albacete-Alcázar)	9.313	
	L.A.V. Madrid-Alcázar de San Juan-Jaén	3.135	
TOLEDO	L.A.V. Madrid-Alcázar de San Juan-Jaén	3.326	
	L.A.V. Madrid-Cáceres-Mérida	553	
TOTAL			36.248
GESTOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS			
ALBACETE	L. A. V. Madrid-Levante	23.389	
CUENCA	L. A. V. Madrid-Levante	48.405	
GUADALAJARA	L. A. V. Madrid-Frontera Francesa. Madrid-Lleida. Madrid-Gajanejos	75.218	
	L. A. V. Madrid-Frontera Francesa. Madrid-Lleida. Gajanejos-Calatayud	36.305	
	L. A. V. Madrid-Frontera Francesa. Madrid-Lleida. Estación Guadalajara	9.015	
TOLEDO	L. A. V. Madrid-Levante	3.060	
	L. A. V. Acceso a Toledo	25.243	
TOTAL			220.635
RED NACIONAL DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES (RENFE)			
ALBACETE	Varias actuaciones	2.260	
CIUDAD REAL	Varias actuaciones	8.029	
CUENCA	Varias actuaciones	1.257	
GUADALAJARA	Varias actuaciones	3.047	
TOLEDO	Varias actuaciones	3.119	
TOTAL			17.712

Tabla 2.3.- Distribución del presupuesto de inversión del Ministerio de Fomento en la Comunidad de Castilla-La Mancha para el año 2002



Figura 2.6.- Actuación en la red ferroviaria de Alta Velocidad en la Comunidad de Castilla-La Mancha

El presupuesto de inversión regionalizada del Grupo Fomento en la Comunidad de Castilla-La Mancha viene dada en la Tabla 2.4. En la Tabla 2.5 se muestran presupuestos de inversión regionalizada por entidades del Grupo Fomento para 2002 en la Comunidad.

INVERSIÓN REGIONALIZADA-MINISTERIO DE FOMENTO(Miles de Euros)					
CENTROS GESTORES					
PROVINCIA	D.G. VIVIENDA, ARQUIT. Y URBANISMO	D.G. CARRETERAS	D.G. FERROCARRILES	RESTO Mº. FOMENTO	TOTAL
Albacete	840	100.021	19.921	102	120.884
Ciudad Real	--	31.369	12.448	52	43.869
Cuenca	1.030	21.859	--	120	23.009
Guadalajara	46	21.229	--	2.337	23.612
Toledo	786	23.939	3.879	297	28.898
TOTAL	2.702	198.417	36.248	2.905	240.272

Tabla 2.4.- Presupuestos de inversión regionalizada Ministerio de Fomento para 2002 en la Comunidad de Castilla-La Mancha

INVERSIÓN REGIONALIZADA-ENTIDADES GRUPO FOMENTO(Miles de Euros)					
ENTIDADES					
PROVINCIA	AENA	CORREOS Y TELÉGRAFOS	G.I.F.	RENFE	TOTAL
Albacete	1.066	1.298	23.389	2.260	28.013
Ciudad Real	--	1.454	--	8.029	9.483
Cuenca	--	883	48.405	1.257	50.545
Guadalajara	--	807	120.538	3.047	124.392
Toledo	--	2.939	28.303	3.119	34.361
TOTAL	1.066	7.381	220.635	17.712	246.794

Tabla 2.5.- Presupuestos de inversión regionalizada por entidades del Grupo Fomento para 2002 en la Comunidad de Castilla-La Mancha

2.5 Antecedentes en el desarrollo del transporte ferroviario en la Unión Europea

En el seno de la Unión Europea, la política común del transporte encuentra su origen a nivel constitucional en el Título IV del Tratado de Roma (1957) [19]. Desde entonces, las empresas operadoras del sector ferroviario han sido, en su gran mayoría, de carácter estatal, cuyo mercado de actuación ha sido monopolista. Estas empresas han venido soportando grandes déficit, respaldados con ayudas y/o subvenciones públicas, así como, con políticas de actuación centradas en el ámbito social y estratégico de la Nación. Todo ello ha perdurado hasta 1991, dictándose numerosas normas con el fin de regular y liberalizar dicho mercado del sector del transporte. Las nuevas directivas ponen de manifiesto la necesidad de incrementar la seguridad y fiabilidad en este tipo de transportes como consecuencia de dicha liberalización, tanto por la salud de los pasajeros como por la de los trabajadores, intentando con ello evitar las consecuencias catastróficas que se han estado dando tras dichas liberalizaciones en otros países, como es, por ejemplo, en el Reino Unido.

La integración multimodal del sistema de transporte de la Unión Europea es una exigencia básica para la sostenibilidad de la vida sobre el territorio europeo. La integración del transporte ha de estar basada en el criterio fundamental de favorecer el trasvase del transporte individual y por carretera al transporte público colectivo y por ferrocarril. Este criterio político, de urgente desarrollo, no aparece todavía como prioritario en las instituciones de la Unión Europea, ni en el Parlamento, ni en la Comisión, ni el Consejo.

En este terreno, Suiza y la Unión Europea alcanzaron, el 2 de diciembre de 1998, el nuevo acuerdo sobre el tránsito de mercancías a través de los Alpes. Suiza comenzó a abrir progresivamente las fronteras a los camiones de más de 28 toneladas a partir del año 2000, para que en el 2005 la apertura sea total.

En 1997, España recibió del Fondo de Cohesión 1.529 millones de Euros, de los que el 56,3 por ciento correspondió a proyectos de medio ambiente y el 43,7 por ciento a infraestructuras para el transporte. De los 672 millones de Euros recibidos para el sistema de transporte, 433 millones fueron destinados a carreteras y 235 millones al ferrocarril.

Es conveniente reseñar que el enlace multimodal de España y Portugal con el resto de Europa, con alto grado de participación ferroviaria, ha substituido a la autopista Lisboa-Valladolid entre los 14 proyectos prioritarios de las redes transeuropeas [2]. Este nuevo programa de infraestructuras para el transporte en el ámbito de la Península Ibérica ha sido incluido durante la Cumbre de Cardiff, celebrada en junio de 1998, dentro de los 14 proyectos definidos en Essen. El Consejo Europeo de Ministros celebrado en Dublín, en diciembre de

1997, ya había aprobado la modificación, propuesta por Portugal, que fue ratificada definitivamente en Cardiff.

De los 14 proyectos de infraestructuras prioritarias para el transporte transeuropeo (ver Figura 2.7), cinco están localizados en los Estados beneficiarios del Fondo de Cohesión. Dichos Estados, entre 1993 y 1997, recibieron 1.516 millones de Euros para facilitar la ejecución de las nuevas infraestructuras, según refleja el Informe Anual del Fondo de Cohesión de la Comisión Europea más reciente. La ejecución de la red transeuropea de transporte prevista en la actualidad supondrá una inversión de 1.124 mil millones de Euros.



Figura 2.7.- Red Europea de Alta Velocidad y Velocidad Alta para el año 2010

Los fondos Feder también han sido utilizados para la realización de la red transeuropea de transporte durante el mismo período, 1993-1997, con aplicación de 532 millones de Euros. Al mismo tiempo, el Banco Europeo de Inversiones, ha concedido préstamos por 1.616 millones de Euros a los "proyectos de Essen" y el Fondo Europeo de Inversiones concedió 55 millones de Euros en concepto de garantías de préstamo.

Junto a los proyectos ligados a la Península Ibérica, el proyecto de Alta Velocidad y Transporte Combinado Norte-Sur, que también forma parte de los 14 aprobados en la Cumbre de Essen, se desarrolla a través de Alemania, Austria e Italia, con cruce de los Alpes por el paso del Brennero. Este eje conectará Berlín, con Leipzig, Núremberg, Múnich, Innsbruck y Verona, con un tramo de 550 km desde Berlín a Núremberg, y otro tramo de 410 km desde

Múnich a Verona. En la travesía de los Alpes se construirá un túnel entre Innsbruck (Austria) y Fortezza (Italia). Toda la línea estará preparada para la circulación mixta de viajeros y mercancías, con velocidades máximas de 200-220 km/h. A este respecto conviene recordar que en España existe un empeño por construir la línea Madrid-Barcelona-frontera para velocidades máximas de 350-400 km/h.

La mayor parte de la inversión a realizar en el eje centroeuropeo norte-sur será proporcionada por los presupuestos estatales. En Alemania, el Gobierno federal y la empresa ferroviaria DB, Deutsche Bahn, han establecido un convenio de financiación. Austria ha proporcionado la inversión a través de una agencia financiera pública, y el Banco Europeo de Inversiones, BEI, ha concedido créditos al Gobierno italiano para la ejecución de las obras en aquel territorio. Para la realización del túnel bajo el Brennero se están estudiando posibles asociaciones público-privadas que participen en la inversión, gestión y explotación del nuevo túnel. La UE ha contribuido a la financiación de los tramos en Alemania e Italia y a la financiación de los estudios de viabilidad y factibilidad del túnel bajo los Alpes.

El proyecto denominado Alta Velocidad y Transporte Combinado Francia-Italia consiste en la construcción de 734 km de nueva infraestructura ferroviaria, adecuada para circular a velocidades máximas de 250-300 km/h, conectando la ciudad francesa de Lyon con las italianas de Turín, Milán, Verona, Venecia y Trieste. La inversión necesaria se estima en 16.949 millones de euros. La sección común franco-italiana incluirá un túnel bajo los Alpes de 54 km de longitud cuyos estudios previos están siendo coordinados por la correspondiente Comisión Intergubernamental Italofrancesa, y contratados por la Agrupación Europea de Interés Económico, Alpetúnel, formada por las empresas ferroviarias Ferrovie dello Stato, FS, y Société Nacional des Chemins de fer Français, SNCF. Es remarcable, que Francia, paladín europeo de la máxima velocidad en el transporte ferroviario, haya recogido ínfulas y proyecte para velocidades de 250 km/h, abandonando las antiguas pretensiones de construir una red transeuropea de alta velocidad útil sólo para trenes de viajeros.

La línea en construcción Madrid-Barcelona-Jonquera necesita una inversión superior a 6.000 mil millones de Euros. Casi la mitad, 3.000 mil millones, están disponibles en el Banco Europeo de Inversiones por si los solicita, como préstamo, el Gobierno general de España. El Ministerio de Fomento podría solicitar dicho préstamo para transferirlo al ente Gestor de Infraestructuras Ferroviarias, empresa pública encargada de la ejecución y administración de la nueva línea de alta velocidad.

El enlace multimodal de España y Portugal con el resto de Europa complementa, en los criterios del Consejo Europeo de Ministros, el proyecto denominado Alta Velocidad del Sur que comprende las líneas férreas Madrid-Barcelona-Montpellier-Nîmes y Madrid-Valadolid-Vitoria-Dax. Además de la línea ferroviaria Lisboa-Valladolid por la Beira Baixa, el enlace multimodal

contempla la conexión ferroviaria de Lisboa con A Coruña por la fachada atlántica y la relación ferroviaria de Lisboa con Sevilla por el Algarve, a través de Faro y Huelva.

La Unión Europea ha cofinanciado durante 1996 y 1997 los estudios y anteproyectos de modernización de las infraestructuras ferroviarias portuguesas, línea del Norte (Lisboa-Porto) y línea de la Beira Baixa (Lisboa-Entroncamento-Vilar Formoso-Fuentes de Oñoro). Estos ejes de conexión de Portugal con el resto de Europa se reúnen a la recientemente remodelada y electrificada línea de la Beira Alta (Porto-Pampilhosa-Vilar Formoso-Fuentes de Oñoro). La UE también ha cofinanciado los estudios y anteproyectos de la futura renovación y electrificación del tramo ferroviario Fuentes de Oñoro-Valladolid en la línea Lisboa-Porto-Valladolid-Vitoria-Dax-Bordeaux, así como los análisis y anteproyectos del eje Tui-Redondela-Santiago de Compostela-Coruña en la fachada atlántica de la Península Ibérica.

En el municipio de Coslada, en la Comunidad de Madrid, en enero de 1999, comenzaron las obras del Puerto Seco de Madrid, nueva terminal ferroviaria de contenedores que entró en funcionamiento en 1999. La nueva infraestructura pretende convertirse en un nodo destacado de la red logística transeuropea de transporte. Dentro del sistema portuario de la Península Ibérica, Puerto Seco de Madrid mantiene conexiones rápidas y accesos directos a los servicios de transporte de los puertos marítimos de Bilbao, Algeciras, Valencia y Barcelona. La concesión de la explotación privada de la terminal, que es propiedad de la empresa estatal Puerto Seco de Madrid, ha sido adjudicada a Puerto Rail, empresa constituida por Urbaser (filial de Dragados), que ostenta el 45 por ciento del capital, Transfesa (con el 27 por ciento), Renfe (18 por ciento), y Spain Rail (10 por ciento). Las vías de expedición y recepción del Puerto Seco de Madrid sirven de conexión entre la red ferroviaria general, en la entrada a la estación de mercancías de Vicálvaro, y el haz de vías de la propia terminal.

2.6 Crecimiento y desarrollo del sistema ferroviario en la Unión Europea

El transporte ferroviario mantiene la tendencia de crecimiento en la Unión Europea. El transporte ferroviario de mercancías se incrementó, el primer semestre de 1998, en un 4,4 por ciento. Los desplazamientos de las personas utilizando el tren se incrementaron, en el mismo período, y en el conjunto de Estados miembros de la UE, en el 3,4 por ciento. Estos datos indican que continúa el crecimiento de la actividad del sector ferroviario, que mantiene esta tendencia desde hace más de año y medio. Los datos han sido registrados por la Unión Internacional de Ferrocarriles, UIC [21], y la Comunidad Europea del Ferrocarril, CCFE-CER-GEB [20].

El conjunto del transporte ferroviario de mercancías, tráfico internacional más tráfico en el interior de los Estados, ha tenido un crecimiento del 4,4 por ciento, alcanzando un volumen de 126,7 mil millones de toneladas por kilómetro. El tráfico internacional de mercancías alcanzó un incremento del 7,2 por ciento, en comparación con los resultados alcanzados en el mismo

período del año anterior. En la primera mitad de 1998 se transportaron 58 mil millones de toneladas por kilómetro frente a los 54 mil millones trasladados entre enero y julio de 1997.

El transporte de viajeros también ha mantenido la tendencia al crecimiento, en este primer semestre, con cerca de 140 mil millones de pasajeros por kilómetro, lo que representa un incremento del 3,4 por ciento respecto al mismo período de 1997. En Dinamarca el desplazamiento en tren de las personas se ha incrementado en un 14,5 por ciento, seguido de un 7,9 por ciento en Francia, un 6,6 por ciento en España y 4,9 por ciento en el Reino Unido. En el tráfico de mercancías las subidas más fuertes se han producido en los Países bajos, con un 18 por ciento, en Suiza, con un 10,9 por ciento, en Austria, con un 8,5 por ciento, y en Bélgica, con un 5,6 por ciento.

Para la Comunidad Europea del Ferrocarril, CCFE-CER-GEB, estas cifras muestran la vitalidad del transporte ferroviario en un contexto de débil inversión en la creación de nuevas infraestructuras ferroviarias, y de mejora y mantenimiento de las existentes. Si las autoridades públicas desean transferir cargas de la carretera al ferrocarril, deben superar con inversiones los déficit de capacidad de la infraestructura ferroviaria en relación con la carretera y deben resolver los estrangulamientos de la red transeuropea. El ejemplo de Dinamarca es muy claro, ya que tras la apertura del enlace fijo del Gran Belt se ha generado un incremento del 60 por ciento en el transporte ferroviario de ese corredor.

El 8 de diciembre de 1998, la Comunidad Europea del Ferrocarril y varias entidades europeas interesadas en el mundo del transporte ferroviario, se reunieron en Bruselas para analizar la política de la Comisión Europea sobre el trasvase de tráfico desde la carretera al ferrocarril, tomando en consideración que la carretera es responsable del 93 por ciento de los costes externos del transporte, y que estos gastos representan el 4 por ciento del PIB de la Unión Europea.

La relación entre sistema de transporte y empleo ha sido analizada en Alemania concluyendo que se generan 208.000 nuevos puestos de trabajo y se reduce el 24 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono causadas por el transporte si, en el año 2010, los desplazamientos en ferrocarril son el doble de los viajes en tren que se realizan en la actualidad y alcanzan los 1.700 km de recorrido ferroviario por persona y año. La simulación ha sido realizada por las entidades Öko-Institut de Friburgo [13] y Verkehrsclub Deutschland [20].

Las necesidades de material rodante ferroviario en el supuesto sostenible crecen más del 50 por ciento en trenes y el 20 por ciento en tranvías. También crece la demanda de autobuses urbanos en un 60 por ciento. La mejora de la eficiencia conlleva el que los costes del transporte motorizado son menores que en la actualidad, a pesar del aumento del precio de los combustibles. El supuesto de transporte sostenible crea 338.000 nuevos puestos de trabajo y

elimina 130.000, generando por tanto 208.000 nuevos empleos (aproximadamente el 0,5 por ciento de la población activa). Los nuevos puestos de trabajo, en relación a los que se pierden, están mejor repartidos geográficamente, más vinculados al territorio, y menos expuestos a la competencia de la globalización. El resultado es que las mismas necesidades y deseos de movilidad se cubren con menor gasto económico y con menor impacto ambiental.

Todas estas mejoras no serían posibles sin atender de una forma especial a los puntos críticos que constituyen la superestructura ferroviaria. Por ello en el siguiente capítulo se presenta uno de los elementos más relevantes de los que conforman: Los Desvíos Ferroviarios. Además hay que considerar que en los sistemas de transportes en general, y en particular el transporte férreo de alta velocidad, la seguridad juega un papel primordial. Esto hace que sea necesario incrementar la seguridad de este tipo de sistemas, tanto por la salud de los pasajeros como la de los trabajadores.

La fiabilidad es el factor, tras la seguridad, donde se centran la mayoría de los propósitos en el desarrollo y mantenimiento de los elementos relacionados con este medio de transporte. En el siguiente capítulo se desarrollarán también estos aspectos.

Referencias

- [1] Ibeas, A., Díaz, J.M. y de la Lastra, P., 1994. *Transportes. Nociones Básicas*. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2ª Edición.
- [2] Decisión 1692/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Julio de 1996 sobre las orientaciones comunitarias para el desarrollo de la red transeuropea de transporte. DOCE 228/L, de 09-09-96.
- [3] Decreto 2927/1965, de 24 de septiembre, *Estatuto de FEVE*.
- [4] Decreto 584/1974, de 21 de febrero, *Estatuto de FEVE*.
- [5] Decreto de 11 de julio de 1941, organiza la *RENFE*.
- [6] Decreto de 16 de diciembre de 1949, aprueba el Reglamento para la aplicación de la *Ley de Coordinación de los Transportes Mecánicos Terrestres* de 27 de diciembre de 1947.
- [7] Decreto de 9 de diciembre de 1949, aprueba el Reglamento para la aplicación de la *Ley de Ordenación de los Transportes Mecánicos por Carretera* de 27 de diciembre de 1947.
- [8] FEVE, *Ferrocarriles de Vía Estrecha*. <http://www.feve.es>
- [9] *Ley de Bases de Ordenación Ferroviaria y del Transporte por Carretera*, de 24 de enero de 1941.
- [10] *Ley Ordenación del Transporte Terrestre (L.O.T.T.)*. Ley 16/1987 de 30 de Julio (B.O.E. nº 182 de 31 de julio de 1987).
- [11] Muñoz, M., Sanz, J. y Vidal, J., 1999. *Siglo y medio del ferrocarril en España, 1848-1998*. Fundación de Ferrocarriles Españoles y el Instituto de Cultura Juan Gil Albert, Diputación Provincial, D.L.
- [12] *Ministerio de Fomento*. <http://www.mfom.es>
- [13] *Öko-Institut e V.*: <http://www.oeko.de>
- [14] Real Decreto de 12 de agosto de 1912, *Reglamento de Ferrocarriles Secundarios y Estratégicos*.
- [15] Real Decreto de 22 de septiembre de 1917, reglamentación del artículo 17 de la Ley de 23 de febrero de 1912, que modificaba la *Ley de Ferrocarriles Secundarios y Estratégicos*.
- [16] Real Decreto de 24 de mayo de 1878, *Reglamento de la Ley General de Ferrocarriles*.
- [17] RENFE, *Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles*. <http://www.renfe.es>
- [18] Cameron, R., 1988. *Historia Económica Mundial. Desde el Paleolítico hasta el Presente*. Alianza Editorial, 2ª Edición.
- [19] *Tratado constitutivo de la Comunidad Europea*. Roma, 25 de marzo de 1957. <http://europa.eu.int/abc/obj/treaties/es/estoc.htm>
- [20] *Verkehrsclub Deutschland*. www.vcd.org
- [21] Community of European Railways, <http://www.cer.be>
- [22] International Union of Railways. http://www.uic.asso.fr/home/home_en.html

3 Desvíos ferroviarios

Desde el origen de la política común del transporte ferroviario, en el tratado IV de Roma en 1957, hasta nuestros días, dicho sector ha sufrido numerosos cambios y mejoras en todos los campos, como puede ser el legislativo, técnico, seguridad, etc. En el presente capítulo se describirá los cambios más significativos, haciendo especial hincapié a los relativos a la seguridad, y más concretamente en lo referente a la superestructura ferroviaria.

La seguridad de la superestructura ferroviaria depende de los elementos que la componen, en especial de los elementos críticos, siendo el más relevante el desvío ferroviario. Los primeros desvíos se desarrollaron en 1796. Desde entonces, éstos han experimentados numerosas modificaciones y transformaciones, siendo algunos de los más destacados el cambio de John Curr, de Contratista, de Poiret, de Stephenson, etc., y los de agujas rectas, secantes, tangentes, y de punta achaflanada.

Se podría decir que la transformación más relevante dada en los desvíos desde sus orígenes hasta hoy en día ha sido la de pasar de cambios de carriles móviles al cambio de contracarriles móviles, y por último, al cambio de dos agujas móviles. Los recientes avances se han dado como consecuencia del desarrollo de la alta velocidad en este tipo de transportes, siendo los más relevantes el procedimiento Schwiag, Fakop o Catfersan.

Además de tratar en el capítulo los temas mencionados, se describirán las partes más representativas de los desvíos ferroviarios, y se concluirá el tema analizando su mercado en España.

Índice de contenidos

3	Desvíos ferroviarios.....	51
3.1	Exigencias para el cambio y mejora del mantenimiento de la superestructura ferroviaria.....	56
3.2	Nuevas tecnologías empleadas en la infraestructura ferroviaria	57
3.3	Importancia de los desvíos ferroviarios.....	59
3.4	Desvíos Ferroviarios	61
3.4.1	Introducción	61
3.4.2	Conceptos básicos	63
3.4.2.1	Carriles de unión y cruzamiento	63
3.4.2.2	Cambio	66
3.5	Evolución de los desvíos ferroviarios	76
3.6	Nuevas tendencias en el diseño de los desvíos ferroviarios.....	80
3.7	Tipos de desvío empleados en España.....	81
3.8	Análisis del mercado de los desvíos ferroviarios	86
	Referencias.....	89
	Anexo A1. Perfiles de carriles	92
	A1.1 Perfil del carril UIC54	92
	A1.2 Perfil del carril UIC54A.....	93
	A1.3 Perfil del carril UIC54B.....	94
	A1.4 Perfil del carril UIC60	95
	A1.5 Perfil del carril UIC60B.....	96
	Anexo A2. Características básicas de los desvíos tipo A, B, C, V y AV	98
	A2.1 Desvíos ancho 1.435 mm y carril UIC54	98
	A2.2 Desvíos ancho 1.435 mm y carril UIC60	100
	A2.3 Desvíos ancho 1.668 mm y carril UIC54	102
	A2.4 Desvíos ancho 1.668 mm y carril UIC60	104
	Anexo A3. Dimensiones características de los desvíos tipo B, C, V	106
	A3.1 Desvío tipo B.....	107
	A3.2 Desvío tipo C.....	110
	A3.3 Desvío tipo V	111
	A3.4 Tipo B, ancho de vía 1.435 mm	112
	A3.5 Tipo B, ancho de vía 1.668 mm	113
	A3.6 Tipo C, ancho de vía 1.435 mm.....	114
	A3.7 Tipo C, ancho de vía 1.668 mm.....	115
	A3.8 Tipo V, ancho de vía 1.435 mm	116
	A3.9 Tipo V, ancho de vía 1.668 mm	117
	A3.10 Tipo AV, ancho de vía 1.435 mm.....	118

Índice de figuras

Figura 3.1.- Accionamiento de agujas (Wisconsin Central, EEUU)	62
Figura 3.2.- Cruzamiento y carriles de unión.....	64
Figura 3.3.- Corazón	64
Figura 3.4.- Contracarril	65
Figura 3.5.- Principales elementos del mecanismo de accionamiento de agujas.....	66
Figura 3.6.- Partes más significativas del cambio	67
Figura 3.7.- Contacto entre aguja y contraaguja, ambas en posición vertical	68
Figura 3.8.- Sistema orquilla-muñón.....	69
Figura 3.9.- Tope de aguja	69
Figura 3.10.- Cojinetes de resbalamiento o resbaladeras (marcadas en línea continua).....	71
Figura 3.11.- Mecanismo de encerrojamiento de un desvío convencional	72
Figura 3.12.- Principales variables geométricas de los desvíos ferroviarios.....	73
Figura 3.13.- Sección de aguja Brunel	73
Figura 3.14.- Perfil de agujas asimétricos	74
Figura 3.15.- Motor de accionamiento de agujas (Alston).....	75
Figura 3.16.- Cambio de carriles móviles	76
Figura 3.17.- Cambio de contracarriles móviles	77
Figura 3.18.- Cambio de Stephenson de una sola aguja	78
Figura 3.19.- Cambio de Stephenson modificado	78
Figura 3.20.- Cambio de dos agujas móviles iguales.....	79
Figura 3.21.- Disposiciones más comunes de los desvíos ferroviarios [1].....	80
Figura 3.22.- Estudio cinemático del paso de la rueda por el desvío (VAE [35])	80
Figura 3.23.- Desvío de Alta Velocidad (JEZ)	82
Figura 3.24.- Construcción de un desvío de AV para ser instalado en la línea Madrid-Sevilla ..	85
Figura 3.25.- Desvío ferroviario provisto de sistema de calefacción.....	85
Figura A1.1.- Perfil del carril UIC54	92
Figura A1.2.- Perfil del carril UIC54A.....	93
Figura A1.3.- Perfil del carril UIC54B.....	94
Figura A1.4.- Perfil del carril UIC60	95
Figura A1.5.- Perfil del carril UIC60B.....	96
Figura A1.6.- Perfil del carril U69.....	97
Figura A3.1.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B	106
Figura A3.2.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B, C y V	109
Figura A3.3.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B, C y V (anchos de vía 1.435 y 1.668 mm), y AV (ancho de vía 1.435 mm)	111

Índice de tablas

Tabla 3.1.- Costes anuales para un tramo de infraestructura en UK (2001), siendo UKP la libra esterlina [11]	60
Tabla 3.2.- Principales costes y fallos de los componentes básicos en una infraestructura ferroviaria (2001) [11]	60
Tabla 3.3.- Tipos de cruzamientos	66
Tabla 3.4.- Combinaciones de tipos de cambio y cruzamiento	81
Tabla 3.5.- Mercado español de cruces y desvíos ferroviarios en 2001	86
Tabla 3.6.- Volumen de ventas de las empresas más destacadas en los sectores de los cruces y desvíos ferroviarios (millones de Euros)	88
Tabla A1.1.- Características principales del carril UIC54	92
Tabla A1.2.- Características principales del carril UIC54A	93
Tabla A1.3.- Características principales del carril UIC54B	94
Tabla A1.4.- Características principales del carril UIC60	95
Tabla A1.5.- Características principales del carril UIC60B	96
Tabla A1.6.- Características principales del carril U69	97
Tabla A2.1.- Descripción de los desvíos de ancho 1.435 mm y carril UIC54	99
Tabla A2.2.- Descripción de los desvíos de ancho 1.435 mm y carril UIC60	101
Tabla A2.3.- Descripción de los desvíos de ancho 1.668 mm y carril UIC54	103
Tabla A2.4.- Descripción de los desvíos de ancho 1.668 mm y carril UIC60	105
Tabla A3.1.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B, según Figura A3.1 (mm)	107
Tabla A3.2.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B, según Figura A3.2 (mm)	108
Tabla A3.3.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C, según Figura A3.2 (mm)	110
Tabla A3.4.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V, según Figura A3.2 (mm)	111
Tabla A3.5.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)	112
Tabla A3.6.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)	113
Tabla A3.7.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)	114
Tabla A3.8.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)	115
Tabla A3.9.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)	116

Tabla A3.10.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)	117
Tabla A3.11.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo AV y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)	118

3.1 Exigencias para el cambio y mejora del mantenimiento de la superestructura ferroviaria

En el seno de la Unión Europea, la política común del transporte ferroviario encuentra su origen a nivel constitucional, como se indicaba en el capítulo anterior, en el Título IV del Tratado de Roma (1957) [34]. Desde entonces, las empresas operadoras del sector han sido, en su gran mayoría, de carácter estatal, cuyo mercado de actuación ha sido monopolista. Estas empresas han venido soportando grandes déficit, respaldados con ayudas y/o subvenciones, cuyo sector principal de servicio ha sido el público, así como con políticas de actuación centradas en el ámbito social y estratégico de la Nación. Todo ello ha perdurado hasta 1991, dictándose numerosas normas con el fin de regular y liberalizar dicho mercado del sector del transporte, como son los reglamentos 11/1960 [25], 1191/1969 [23], 1192/1969 [24], 1107/1970 [22] y 1893/1991 [21]. Finalmente, mediante la Directiva 440 del 29 de julio de 1991 [7], llevada a cabo por la puesta en marcha del Mercado Único, se regulariza el desarrollo del sector del transporte ferroviario, impulsado por el Tratado de Maastricht, involucrando tanto al sector de servicios y explotación, definidas anteriormente en el Tratado de Roma, como a las infraestructuras. La Directiva 440/91 fue completada con las Directivas 95/18/CE [8] y 95/19/CE [9], así como, las recientes 2001/12/CE [4], 2001/13/CE [5] y 2001/14/CE [6].

Según la Directivas del Consejo 18/1995 y 19/1995, se establece la separación entre el administrador de infraestructura¹ y la empresa de servicios. También se define como funciones fundamentales el acceso, tarificación, licencias y la seguridad. Concretamente, en la Directiva 19/1995, se exige una certificación de seguridad para la adjudicación de las capacidades de la infraestructura ferroviaria. Una consecuencia directa de dichas Directivas fue, en el ámbito de la infraestructura ferroviaria, la creación en España del Ente Gestor de Infraestructura Ferroviaria, GIF [10], según los artículos 160 y 161 de la ley 13/1996, cuyo Estatuto fue aprobado por el Real Decreto 613/1997 [19]. GIF se establece como responsable único de la construcción y conservación de toda la infraestructura ferroviaria, así como de su administración, tanto en la infraestructura convencional como la alta velocidad, aunque actualmente esta función la comparte con la sección de Mantenimiento de Infraestructura de RENFE.

En las Directivas anteriormente citadas, y en especial en las Directivas 2001/12/CE, 2001/13/CE y 2001/14/CE, se pone de manifiesto la necesidad de incrementar la seguridad en este tipo de transportes, tanto por la salud de los pasajeros como por la de los trabajadores.

¹ Administrador de infraestructura es cualquier organismo o empresa responsable de la instalación y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.

Para ello, se exige elaborar, en el caso de la Unión Europea (UE), por parte del administrador de la infraestructura de los distintos Estados miembros de la UE, un programa de actividad orientado a garantizar un uso eficiente de la infraestructura (artículo 4.4 de la Directiva 2001/12/CE [4]). Estas funciones podrán incluir asimismo la gestión de los sistemas de control y de seguridad de la infraestructura. Según se pone de manifiesto en la Directiva 2001/14/CE, fomentar un uso óptimo de la infraestructura ferroviaria reducirá el coste de este tipo de transporte [6]. En esta línea, se está intentando incentivar, por parte de la UE, a las empresas ferroviarias y a los administradores de infraestructuras para que reduzcan al máximo las perturbaciones y mejoren el funcionamiento de la red ferroviaria. Este incremento de la seguridad debe ir asociado a mejorar la calidad y fiabilidad de los equipos e instalaciones, y en especial de los más críticos de la superestructura ferroviaria, a fin de proteger a sus clientes y a terceros y ofrecer un servicio con un alto nivel de seguridad, según se dicta en la Directiva 2001/13/CE [5]. En consecuencia, es exigible un análisis en función de los niveles de seguridad de la infraestructura del sistema ferroviario de alta velocidad, y muy especialmente de sus elementos críticos, haciendo uso para ello de las nuevas tecnologías empleadas en el sistema ferroviario. En la sección siguiente se hará mención a las tecnologías más destacadas incorporadas recientemente en el sistema ferroviario español.

3.2 Nuevas tecnologías empleadas en la infraestructura ferroviaria

La misión principal del Administrador de infraestructura es la de garantizar la disponibilidad de la misma, proporcionando a los operadores comerciales la fiabilidad de las instalaciones requerida y mejorando sus prestaciones, con el propósito de garantizar la seguridad en la circulación, y todo ello unido a unos costes mínimos. Esto se ve reflejado, en el caso concreto de España, en una disminución continuada, desde el año 1994 hasta el año 2000, de la relación entre los gastos totales de mantenimiento y los ingresos comerciales por tráfico en RENFE, pasando del 59,8 % al 46,1 %. Del mismo modo, el índice de accidentalidad² ha ido decreciendo desde 1991 hasta hoy, pasando de 2,31 a 0,83, salvo en el año 1996, el cual aumento en 0,15 respecto al año anterior.

Esto está directamente relacionado con el incremento del número de trenes y de su velocidad en estos últimos años, repercutiendo en los métodos y en los intervalos de actuación frente a las labores de mantenimiento y reparación de averías. Así pues, se ha de velar por una reducción del número de averías y, básicamente, la duración de éstas. Dentro de esta línea de actuación, RENFE ha implantado nuevas tecnologías que han transformado los productos clásicos de señalización, tales como: enclavamientos (666 en el año 2000); bloqueos; telemandos; circuitos de vía, etc., e introduciendo otros nuevos como los enclavamientos

² El índice de accidentalidad viene dado por la relación entre la frecuencia de accidentes imputables a mantenimiento de infraestructura y los millones de kilómetros recorridos.

electrónicos (50 en España, constituidos por 6 tecnologías diferentes); sistema de asistencia a la conducción automática ATP-LZB (a lo largo de 1000 Km de vía); bloqueos electrónicos (1200 Km, con 5 tecnologías distintas); sistemas de C.T.C. (1000 Km); circuitos de vías sin juntas (4500 Km); sistemas LZB (50 Km); etc. En esta línea, se ha evaluado el estado y funcionalidad de las instalaciones, controlando y analizando los índices de accidentalidad e incidencias, desarrollando un sistema de actualización permanente del inventario de las mismas, conocido como SITOI.

Toda esta incorporación de nuevas tecnologías en la infraestructura ferroviaria española requiere de una moderna y completa red de telecomunicaciones. Esto permitirá intercambiar una gran cantidad de información, interconectar los diferentes centros de trabajo, y fomentar las actividades de gestión, dirección y control. Así pues, RENFE, en 1991, desarrolló el Plan General de Telecomunicaciones, donde se contempló la digitalización de la red de comunicaciones, creando un sistema digital de cables de fibra óptica y radioenlaces, y concertando acuerdos con otros operadores de telecomunicaciones como Retevisión, OACYT, Telefónica, etc.

Desde entonces se han creado 94 centrales telefónicas digitales, con 18.350 líneas de abonado, accediendo mediante conexión digital desde 1995 a las redes telefónicas de los ferrocarriles europeos. Se dispone de 31 nodos dinámicos, conmutadores de transmisión de 64 Kbit/s y 2 Mbit/s, con una longitud de red de fibra óptica de 10.300 Km.

Tanto la incorporación de nuevas tecnologías, como el desarrollo de la nueva red de telecomunicaciones, hace que sea posible poder incorporar nuevas técnicas de mantenimiento, las cuales hagan posible que se mejoren la fiabilidad y disponibilidad de los sistemas, empleando unos costes mínimos y aumentando la seguridad en la infraestructura ferroviaria. En esta línea, se creó en 1997 el Comité de Calidad de Mantenimiento de Infraestructura de RENFE, con el fin de asegurar la integración de los niveles de decisión en la dinámica de la calidad, teniendo como referencia principal la Norma ISO 9002:94. Anteriormente, en 1991 ya se creó, en base de su planificación estratégica, el Plan Extraordinario de Mantenimiento de Infraestructura (PEMI), impulsada en parte por las renovaciones realizadas por el Ministerio de Fomento.

Dentro de estas nuevas técnicas de mantenimiento, cobran una importancia relevante las técnicas de mantenimiento predictivo. En el ámbito de esta línea de mantenimiento, el autor describe en la presente tesis un tipo de mantenimiento predictivo/preventivo llamado RCM². RCM² es el resultado de desarrollar conjuntamente el mantenimiento basado en la fiabilidad (Reliability Centred Maintenance, RCM₁) y la monitorización remota basada en la condición (Remote Condition Monitoring, RCM₂).

RCM₁ es una metodología de análisis objetivo, sistemático y documentado, la cual se centra en el mantenimiento preventivo y/o predictivo de los elementos críticos del equipo, así como en un mantenimiento correctivo de los elementos no críticos de dichos productos [16].

Por RCM₂ se entiende la medición de una variable física representativa de la condición de la máquina, y la comparación de esta variable con valores representativos del estado del equipo. Actualmente, la incorporación de las nuevas tecnologías ha hecho posible que dicho concepto se extienda también a la adquisición, preprocesamiento y almacenamiento de datos [28]. Dichas técnicas se describirán con más detalle en los siguientes capítulos.

De los numerosos elementos de los que constituyen la superestructura ferroviaria, los desvíos ferroviarios son uno de los más críticos, siendo éste además el origen y/o la causa de numerosos accidentes ferroviarios, como se pone de manifiesto en numerosas publicaciones técnicas, estudios, proyectos de investigación, etc. En la siguiente sección se hará mención a los más destacados.

La importancia de los desvíos ferroviarios, junto a lo mencionado en los párrafos anteriores, ha hecho que el autor de la presente tesis haya dedicado su trabajo de investigación en estos últimos años en el estudio, diseño, desarrollo y análisis del mantenimiento predictivo RCM² aplicado a los desvíos ferroviarios. Con ello se pretende mejorar y controlar la seguridad en el transporte ferroviario, así como disminuir los costes directos e indirectos como consecuencia de un posible fallo y/o avería en este tipo de mecanismos.

A continuación se resaltan las características más significativas de los desvíos ferroviarios, que hacen de estos uno de los elementos más críticos de la superestructura.

3.3 Importancia de los desvíos ferroviarios

Los desvíos ferroviarios, como se menciona en la sección anterior, son el origen de numerosos accidentes, y es el elemento más crítico de los que componen la superestructura ferroviaria. Suponen aproximadamente el 14 % del total de los fallos y retrasos que se dan en la infraestructura ferroviaria, según el análisis de accidentabilidad de 1992 elaborado por RENFE. Según un estudio llevado a cabo en el proyecto europeo REMAIN [15], los desvíos junto a los circuitos de vía, suponen el 30 % del total de los fallos que se dan en los equipos de señalización, y considerando los equipos de señalización y los desvíos, estos suponen el 55 % del total de los fallos de la superestructura ferroviaria en líneas convencionales. En líneas de alta velocidad, los desvíos representan el 10 % de los fallos totales que se dan en la superestructura ferroviaria.

Desde el punto de vista de los costes que incurren los desvíos ferroviarios, se analizarán, como ejemplo ilustrativo, los datos correspondientes a la red ferroviaria del Reino Unido (UK).

En las Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se exponen la relación de los costes que incurren este tipo de sistemas con respecto a otros de gran relevancia correspondientes a la infraestructura ferroviaria.

	Costes anuales de mejora (1000 UKP)	Coste de mano de obra por fallos (1000 UKP)	Costes totales anuales por fallos (1000 UKP)	Número de Fallos (Unidades)	Equipos mejorados (Unidades)	Costes de mantenimiento (1000 UKP)	Costes totales anuales por mejoras (1000 UKP)
Circuitos de vía AC	1600	500	2100	930	2200	1300	3400
CT-T121	1400	300	1700	530	700	400	2100
Encerrojamiento	650	220	870	580	400	570	1440
HW	620	180	800	400	380	360	1160

Tabla 3.1.- Costes anuales para un tramo de infraestructura en UK (2001), siendo UKP la libra esterlina [11]

	Costes por unidad de mejora por unidad de encerrojamiento (UKP)	Coste por Unidad de Fallo (UKP)
Circuitos de vía AC	1500	2200
TC-T121	3000	3200
Encerrojamiento	3700	1500
HW	3000	1800

Tabla 3.2.- Principales costes y fallos de los componentes básicos en una infraestructura ferroviaria (2001) [11]

Dada la importancia del tema, así como del hecho de que la red ferroviaria de alta velocidad está dotada en la actualidad con el equipo necesario para un accionamiento de agujas por control remoto, se han empezado a llevar a cabo diferentes tipos de proyectos de investigación, cuyo objetivo principal ha sido aumentar la fiabilidad y seguridad de estos sistemas, destacando:

- British Rail Research (BRR)*, actualmente formando parte de AEA Technology [1], trabajó en 1991 con sistemas de accionamiento hidráulicos de agujas controlados mediante ordenador. Transductores de stress, posición y presión fueron empleados en dicho proyecto con el fin de detectar los fallos que se daban, o se podrían dar, en el sistema de accionamiento.
- En ese mismo año, el proyecto *Network South East Condition Monitoring*, centró su investigación en los sistemas eléctricos de accionamientos de aguja. Se emplearon numerosos sensores para controlar mediante ordenador los múltiples parámetros de los que depende el sistema, destacando entre ellos la posición de las agujas y la temperatura ambiente.

- c) *Condition Monitoring System for Electric Point Machine – Japan*, también en 1991, fue un proyecto financiado por Tokaido Shinkansen of Central Japan Railway (JR-Central) Company. Los parámetros controlados fueron: corriente eléctrica del sistema, fuerza de empuje en los raíles y la posición de los mismos en función del tiempo [32].
- d) *Turnout Monitoring System RoadMaster 2000 (1992)*, proyecto dirigido por VAE (compañía australiana) en cooperación con Swiss and Austrian Federal Railways y varios centros de investigación más, estudió los siguientes parámetros y la relación entre ellos: fuerza de empuje, posición de los raíles, sistemas de señalización, temperatura del motor eléctrico de accionamiento y las condiciones medioambientales [33].
- e) *Condition Monitoring System for 4 ft Elecro-Pneumatic PM*, fue un proyecto de investigación llevado a cabo por la Universidad de Birmingham en 1995, realizando un caso práctico en Finchley Central (Northern Line-LUL) [27].
- f) Recientemente se ha finalizado el proyecto europeo *REMAIN (Modular System for Reliability and Maintainability Management in European Rail Transport, 1998)*, el cual se centra más en las consecuencias económicas de una adecuada monitorización remota basada en la condición en los desvíos ferroviarios [15].
- g) Actualmente se está llevando a cabo el proyecto europeo *RAIL (Reliability Centred Maintenance (RCM₁) Approach for Infrastructure and Logistics of Railway Operation)*, donde parte del proyecto se centra en desarrollar un RCM₁ para desvíos ferroviarios [26].

En todos estos proyectos de investigación centrados en los desvíos ferroviarios se pone de manifiesto la importancia de éstos en la superestructura ferroviaria, siendo uno de los elementos más críticos de los que la componen.

3.4 Desvíos Ferroviarios

3.4.1 Introducción

Los desvíos ferroviarios fueron introducidos por primera vez a principios de la década de 1796. Desde entonces, han sufrido incontables mejoras, pero aún así, el modelo básico sigue usándose y sirviendo de referencia en la incorporación de nuevas tecnologías.

El sistema de accionamiento de estos mecanismos puede ser mecánico, eléctrico, electro-hidráulico y, en contadas ocasiones, electro-neumático. Este último ha sido incorporado recientemente con unas ventajas relativas con respecto a los demás, destacando entre ellas, la rapidez de respuesta, su gran potencia y la inmunidad ante las interferencias electromagnéticas. Aun así, el coste por recambios de los motores compresores que éstos emplean han ido aumentando en los últimos años. Este tipo de sistema, por ejemplo, es el que ha empleado recientemente la London Underground Limited (LUL). En la Figura 3.1 se muestra un desvío ferroviario convencional de la línea de ferrocarril de Wisconsin Central, EEUU.



Figura 3.1.- Accionamiento de agujas (Wisconsin Central, EEUU)

Los desvíos ferroviarios constituyen, como se ha mencionado anteriormente, uno de los elementos críticos en la infraestructura ferroviaria, e influyen de forma notable en la seguridad de este tipo de transporte. Por ejemplo, en 1991, el 12 % de los descarrilamientos producidos en España fueron consecuencia directa de los desvíos. Además, es uno de los elementos de la vía sometido a mayores esfuerzos mecánicos y desgaste. Ello hace que dichos elementos suelen tener, por lo general, una vida útil de 3 a 5 veces inferior al resto de la vía. Esto se debe a las discontinuidades que se dan en los desvíos, siendo éstas de aceleraciones transversales, la elasticidad de la vía, en el apoyo de las ruedas al paso de las vías, etc. Todo ello se ve agravado por la velocidad que en ese instante lleve el ferrocarril y por el estado en el que se encuentre el desvío.

De este modo, García y Rodríguez (1995) [12] afirman que los desvíos constituyen el punto más débil de la superestructura de la vía, siendo su ciclo de vida inferior al del resto de la vía y las exigencias de concepción, diseño, fabricación y montaje, las más estrictas.

Además de lo comentado en el párrafo anterior, el coste de la primera inversión es, proporcionalmente, el más alto. En la vía ancha de RENFE, dicho coste está valorado en aproximadamente 950 millones de euros, siendo dicha cantidad en el ancho internacional en la línea AVE de 28,5 millones de euros, considerando en ambos casos el total de los desvíos ferroviarios.

A continuación se darán los conceptos básicos relacionados con los desvíos ferroviarios, y se describirán los elementos más representativos del mismo. También se analizará la evolución sufrida por los desvíos ferroviarios desde su origen, haciendo especial hincapié en las nuevas mejoras incorporadas en ellos como consecuencia de la incorporación de la alta velocidad. Este capítulo concluirá haciendo mención a los diferentes tipos de desvíos, convencionales y no convencionales, que se emplean en España.

3.4.2 Conceptos básicos

García y Rodríguez [12] definen el desvío ferroviario como *un aparato de vía que permite la separación de una vía férrea en dos o varias, cuyos ejes se acuerdan tangencialmente con el de la primera o formando un ángulo muy pequeño con él*. La principal vía es llamada vía directa, siendo la otra vía, en el caso de un desvío sencillo, vía desviada. El desvío consta de tres zonas, llamadas cambio, carriles de unión y cruzamiento, delimitadas éstas por 6 juntas.

En la Figura 3.2 se representan los carriles de unión y cruzamiento, así como las partes más importantes que lo componen. En las Figura 3.5 y Figura 3.6 se muestran el cambio y sus elementos más significativos. La separación de las vías se da en el cambio, y el cruce de los hilos se produce en el cruzamiento. A continuación se describen dichos elementos con mayor profundidad.

3.4.2.1 Carriles de unión y cruzamiento

Los elementos más importantes de los que consta el cruzamiento son el corazón, los contracarriles y carriles. En el corazón (ver Figura 3.3) se da la unión de los carriles que se interseccionan, es decir, la intersección de la vía directa y la desviada. El extremo del corazón hacia el exterior del desvío se le denomina talón del corazón. La prolongación de los carriles para permitir un asiento a la rueda en el paso por la zona del corazón se le llama patas de liebre. Éstas sirven de guiado de las ruedas de los vehículos que han de cruzar el corazón. La zona comprendida por el corazón y las patas de liebre se conoce como laguna, la cual permite el paso de las pestañas de las ruedas del tren. La entrecalle corazón-pata de liebre es la zona comprendida por éstas, es decir, por el corazón y las patas de liebre. La entrecalle permite el paso de la rueda al introducirse en ella su pestaña.

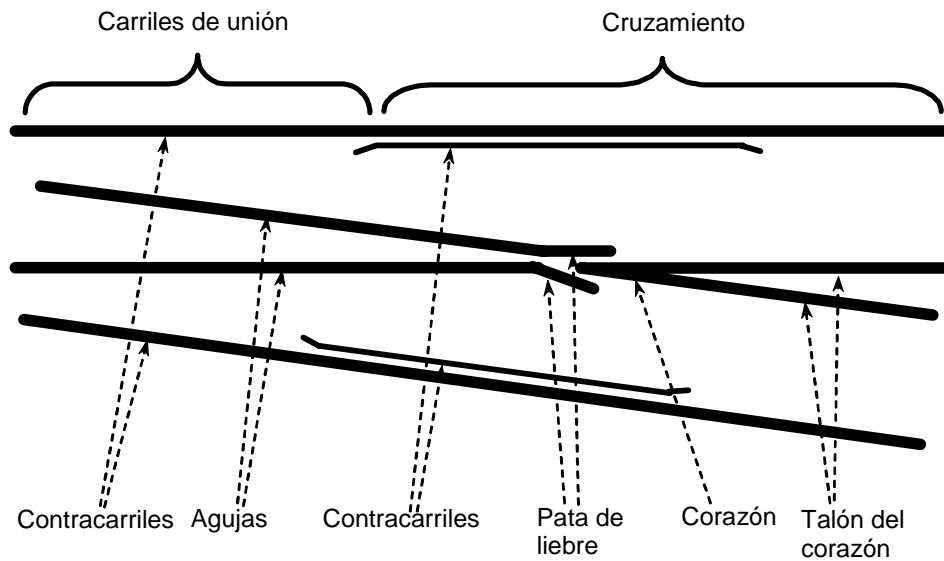


Figura 3.2.- Cruzamiento y carriles de unión

Los corazones más importantes son los de carriles o de carriles ensamblados, corazones de carriles con bloque central y los monobloque o de acero moldeado. Dentro de esta última categoría podemos encontrar los corazones de acero Hafield (o acero al manganeso) y los de acero mejorado mediante perlitzado fino.

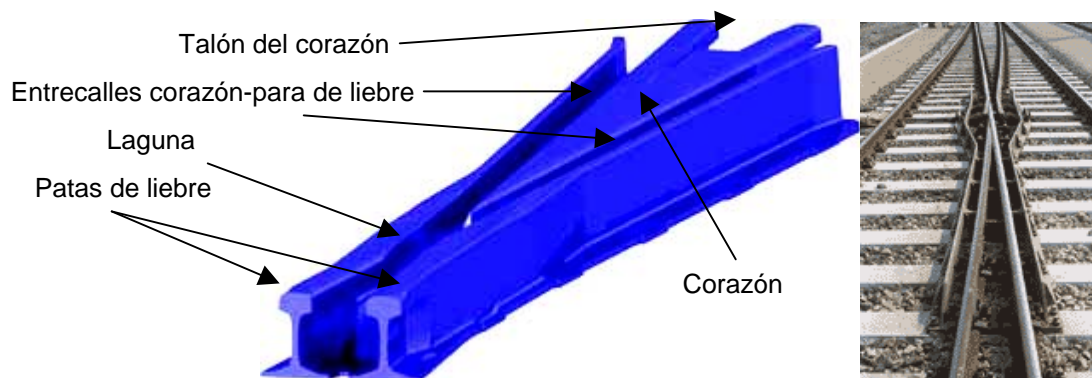


Figura 3.3.- Corazón

Con el propósito de evitar el descarrilamiento del tren y el desgaste del corazón, se dispone de contracarriles en el cruzamiento como, por ejemplo, el mostrado en la Figura 3.4. Éstos aseguran el guiado doble de la rueda de un eje al atravesar la opuesta la laguna. El espacio comprendido entre el carril y el contracarril se denomina entrecalle o huella carril-contracarril. Los contracarriles aseguran el guiado en la zona de la laguna mediante el contacto lateral con la cara interior de la rueda opuesta a la que circula en la laguna. También permiten el

encauzamiento suave de los ejes que van a abandonar el corazón. Es por esta razón que los extremos de los contracarriles se diseñan ligeramente abiertos, al igual que se hace en las patas de liebre.



Figura 3.4.- Contracarril

El objetivo principal en los desvíos de alta velocidad con respecto a los desvíos convencionales es poder permitir una mayor velocidad de circulación por el mismo. Para ello, es necesario aumentar el radio de la vía desviada, por lo que es necesario disminuir el ángulo de cruzamiento, o lo que es lo mismo, aumentar la longitud de la laguna. En ocasiones conviene eliminar la misma, ya que el incremento de su longitud se hace excesivo y no permite el paso de forma segura de los vehículos por el cruzamiento. Otro motivo por el que se ha de eliminar la laguna en los desvíos es por estar sometidos éstos a unas condiciones de trabajo intensas. La solución técnica adoptada por algunas administraciones es la introducción de elementos móviles, como son el corazón de punta móvil y las patas de liebre también móviles.

En la solución correspondiente a las patas de liebre móviles se emplean unos cupones de carril laterales, sujetos a las traviesas mediante sujeciones ordinarias, o de una cuna o armazón de perfiles soldados, atornillado mediante tirafondos a las traviesas, y donde se sitúan todos los elementos del corazón de patas de liebre móviles, con el fin de permitir la transmisión de los esfuerzos de la barra larga soldada necesaria en esta disposición. En muchas ocasiones, el empleo de patas de liebre móviles en los cruzamientos ha ocasionado el descarrilamiento del vehículo, debido al empuje sufrido en ellas por la rueda del mismo. Para ello se han diseñado diferentes mecanismos para permitir la inmovilidad de la pata de liebre una vez acoplada.

El corazón de punta móvil ha sido la solución adoptada en la mayoría de las líneas de alta velocidad. Esta solución consiste en acoplar uno de los lados de la punta de corazón a la pata de liebre, desapareciendo con ello la laguna. La forma de conseguir hacer móvil la punta del corazón es hacerla articulada o flexible. En el primer caso se emplea un bulón pasador, el cual requiere de mantenimientos frecuentes, por lo que se ha optado por emplear los corazones de punta flexible. Los más destacados son el corazón de punta móvil flexible pesado estándar DB y el de las líneas de alta velocidad TGV.

Los defectos más importantes ocasionados por el contacto de las ruedas con los distintos elementos que componen el cruzamiento son el acuñamiento de las pestañas en las correspondientes calles del carril y contracarril, el choque de la cara interna de la rueda en la garganta de entrada al cruzamiento, el choque del borde activo de la pestaña con la punta del corazón, y el encaje de las caras internas del eje montado entre el contracarril y la pata de liebre. En el supuesto contrario, se podrían dar cualquiera de los casos mencionados. La Tabla 3.3 muestra los diferentes tipos de cruzamiento existentes.

Características del cruzamiento	Denominaciones de cruzamientos
Trazado geométrico de los bordes activos de su corazón	Recto y curvo.
Ángulo de cruzamiento	Agudo, obtuso
Tipología constructiva del corazón	Con corazón de bloque central, ensamblado y monobloques.
Movilidad de las piezas del corazón	Móviles y fijos.

Tabla 3.3.- Tipos de cruzamientos

3.4.2.2 Cambio

En el cambio se da desviación de las circulaciones de los vehículos hacia la vía directa o la desviada, mediante la separación dos a dos de las filas de carriles. El cambio consta de, básicamente, agujas, contraagujas, punta de la aguja y talón de la aguja (ver Figura 3.5 y Figura 3.6).

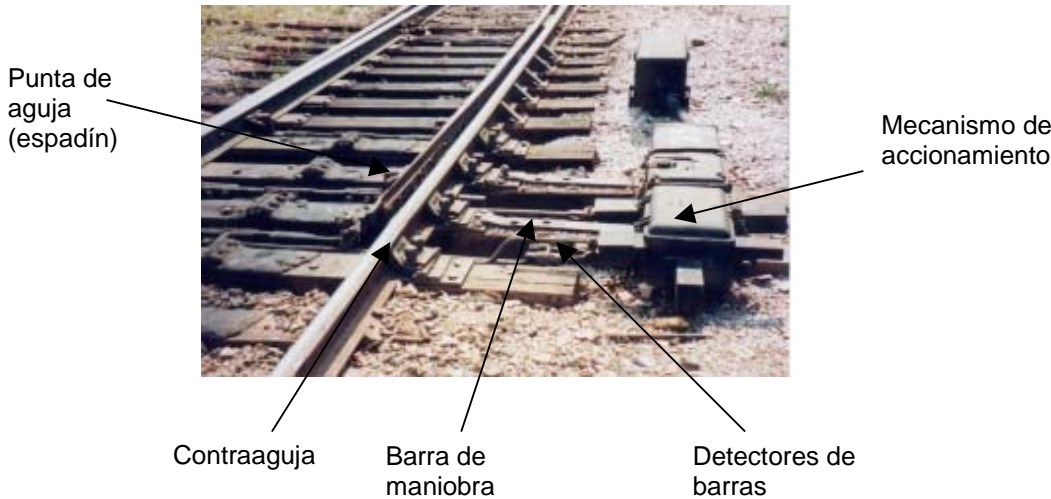


Figura 3.5.- Principales elementos del mecanismo de accionamiento de agujas

Las contraagujas son los carriles exteriores a las agujas, ajustándose, visto en planta, el espadín, o punta de aguja, a ellas. La cara exterior está cepillada para albergar a la aguja, en especial a la punta de la misma, ya que es la parte de la aguja que más vulnerable es ante golpes de las ruedas de los vehículos. Consta de una sujeción elástica en la traviesa por la parte exterior de la contraaguja, mientras que en su parte interior se sitúan los cojinetes de resbalamiento o placas resbaladeras (ver Figura 3.6). Éstas favorecen el desplazamiento lateral de las agujas, aunque dificultan la sujeción elástica de la contraaguja en la traviesa. Los requisitos a cumplir por una sujeción interior de la contraaguja son:

- Mantenimiento del ancho de vía.
- Protección contra deslizamiento relativo entre el carril y la traviesa.

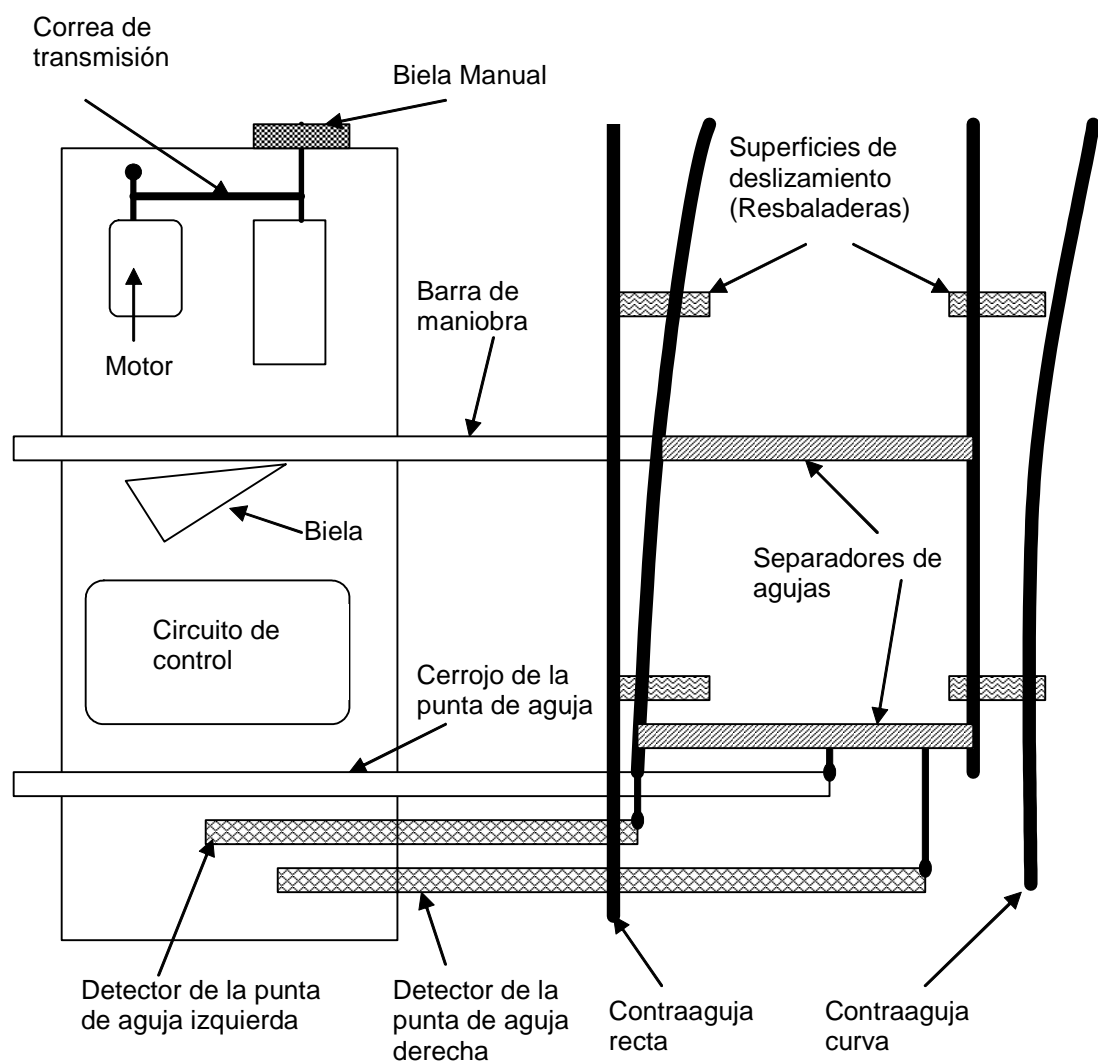


Figura 3.6.- Partes más significativas del cambio

Las distintas formas de colocar la aguja y la contraaguja (ver ejemplo en la Figura 3.7) con respecto a la vertical son:

- Contraaguja y aguja verticales. Entre las ventajas de esta disposición están la sencillez de fabricar las placas de asiento y traviesa, la facilidad de unirlos con los cruzamientos de los carriles ensamblados y la eliminación del efecto torsión al unirlos con el talón de la aguja.
- Contraaguja inclinada 1:20 y aguja vertical. Esta disposición está siendo empleada en vía corriente, permitiendo una gran resistencia a los esfuerzos transversales.
- Contraaguja y aguja inclinadas 1:20. En este diseño es preciso rediseñar el cepillado de la cabeza de la aguja.

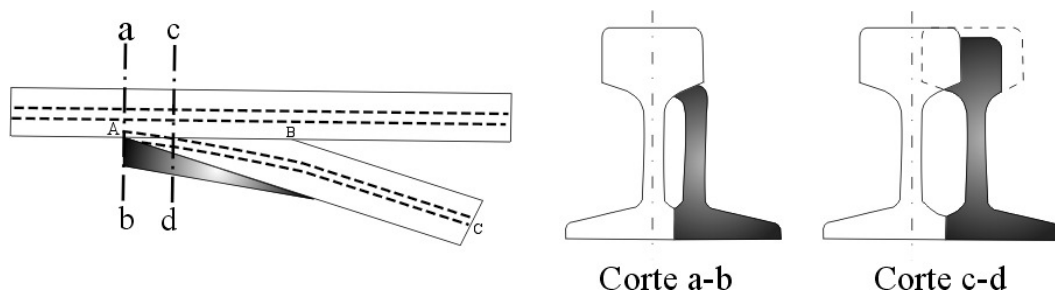


Figura 3.7.- Contacto entre aguja y contraaguja, ambas en posición vertical

El sistema horquilla-muñón, ver Figura 3.8, se emplea para evitar los movimientos longitudinales de la aguja con respecto a la contraaguja, ya que de lo contrario podría darse el caso de que los carriles no ajustasen perfectamente. Este caso se produce principalmente cuando se presenta una dilatación restringida en las agujas, típico en los casos donde se emplea una barra larga soldada. Este fenómeno se muestra con más detalle en la referencia [12].

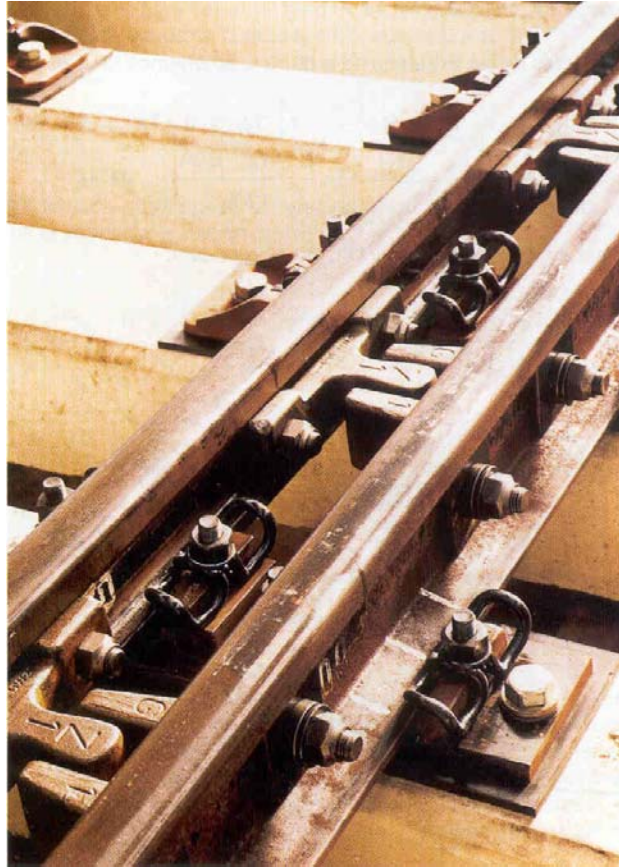


Figura 3.8.- Sistema orquilla-muñón

Los topes de aguja, como el mostrado en la Figura 3.9, constituyen una de las soluciones empleadas para reducir el vano de la aguja sin apoyo transversal, disminuyendo de este modo los efectos de los momentos flectores que se producen en el perfil de la aguja debido a las solicitaciones laterales de los ejes. Además reducen las deformaciones permanentes y permiten mantener el ancho de vía.

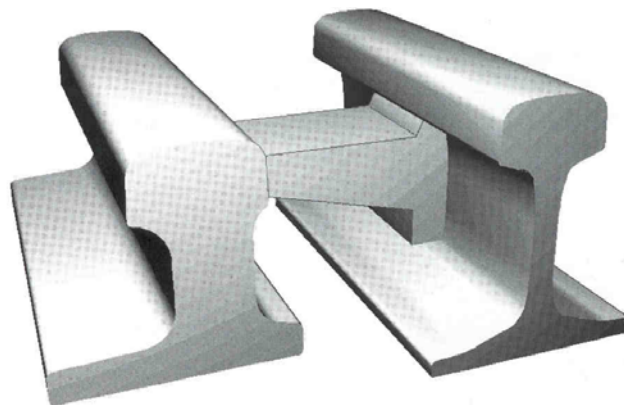


Figura 3.9.- Tope de aguja

Con el propósito de facilitar el desplazamiento horizontal de la aguja se emplean unas placas rígidas de asiento con resbaladeras llamadas cojinetes de resbalamiento, resbaladeras o placas resbaladeras (ver Figura 3.6 y Figura 3.10). La superficie debe ofrecer un bajo coeficiente de rozamiento acero-acero. En este aspecto, en la presente tesis se han llevado a cabo diferentes estudios que se presentan más adelante. La solución empleada para poder disminuir dicho coeficiente de rozamiento ha sido el empleo de grasas, aunque en la actualidad tiende a desaparecer. Esto es debido principalmente a que las grasas, en el caso de ser minerales, constituyen un agente contaminante para el medio ambiente, y el engrasado de las superficies metálicas se realiza de forma manual. Algunas soluciones alternativas que se están empleando en la actualidad son: (a) empleo de otros materiales, como por ejemplo el sistema Ecogliss constituido por dos láminas de poliamida con una malla de fibra de carbono; (b) Reducción o eliminación de la carrera sobre el cojinete de resbalamiento, empleando para ello un sistema de rodillos que elevan la aguja en su movimiento transversal, descendiendo ésta al final de su carrera.

Las juntas se emplean para unir el desvío con los carriles adyacentes. Se emplean 2 juntas correspondientes a los hilos del talón del corazón, 2 en los extremos de los carriles exteriores del cruzamiento y 2 en los extremos de las contraagujas. En un principio, las juntas eran piezas metálicas llamadas bridas. Actualmente se emplean las juntas aislantes encoladas, que no es más que una mejora de las juntas embridadas, las cuales aíslan eléctricamente los dos circuitos de vía contiguos, con lo que proporciona la base de los circuitos de vía.

Uno de los elementos más importantes para la seguridad en el transporte ferroviario es el circuito de vía, desarrollado por primera vez en 1872. El circuito de vía consiste en comprobar que una sección de vía está libre de vehículos, por lo que condicionará, por ejemplo, a las básicas operaciones de accionamiento de agujas en los desvíos ferroviarios, además de poder advertir, por ejemplo, a los operarios de la posición del tren y dirección del mismo. Un estudio sobre otras aplicaciones de los circuitos de vía fue presentado por el autor en la conferencia y exposición anual internacional de AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), celebrada en Washington D.C. (EEUU) en el año 2002 [14]. En dicho estudio se llevó a cabo un análisis de la minimización de los fallos de navegación de los trenes empleando la integración de los sistemas GPS, Balizas y otros.

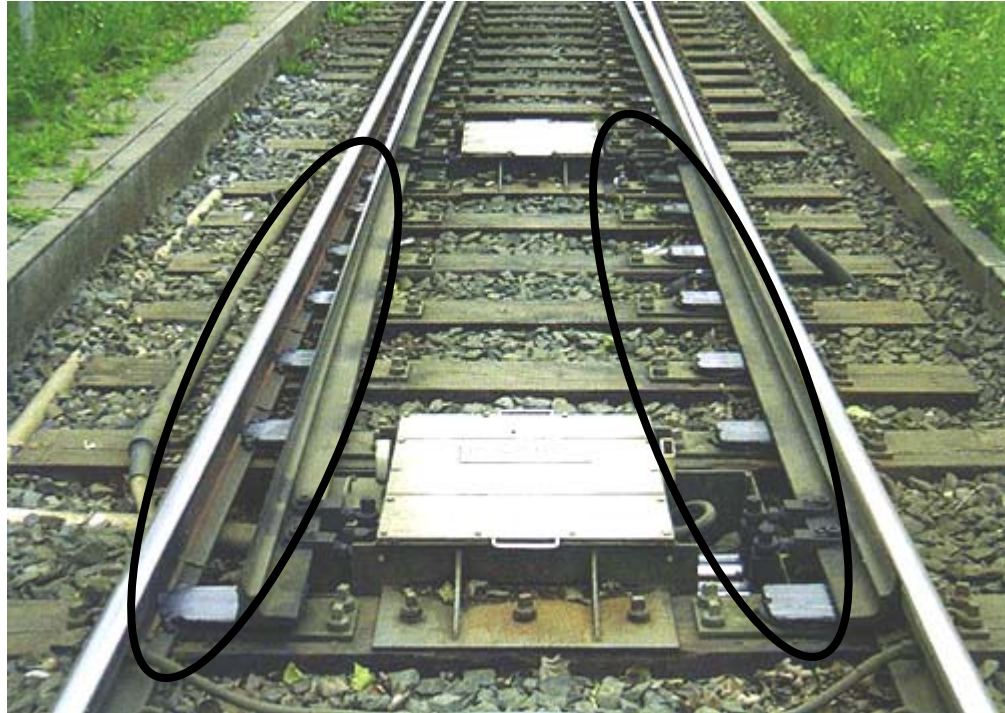


Figura 3.10.- Cojinetes de resbalamiento o resbaladeras (marcadas en línea continua)

El encerrojamiento es el dispositivo empleado para asegurar la posición de las agujas mediante el enclavamiento, anulando los esfuerzos dinámicos correspondiente a la acción que el vehículo ejerce sobre él (ver Figura 3.11). De esta forma se establece una posición correcta de las agujas y las señales, y se evita que se presenten holguras entre la aguja y contraaguja, y se permite la huella necesaria para el paso de la pestaña. A su vez, en dicha retención se impide el movimiento de las agujas mediante esfuerzos estáticos o cuasiestáticos.

Los encerrojamientos han de forzar que la punta de la aguja desacoplada esté a una distancia suficiente de su correspondiente contraaguja, para permitir con ello una huella suficiente que permita el paso de la pestaña, así como el evitar posibles holguras entre la punta de la otra aguja con su correspondiente contraaguja. En los casos en que la agujas tengan una longitud significativa, se emplean más de un dispositivo de enclavamiento, como son en los desvíos de alta velocidad. En todos los casos en que los dispositivos de encerrojamiento no sean manuales, éstos han de permitir el cambio de forma manual. Con el fin de emplear los mismos accionamientos en los diferentes desvíos de una vía, es recomendable que la carrera de maniobra al cambiar las agujas sea la misma en todos los cambios, siendo obligatorio que sean talonables, procurando tener la máxima fiabilidad en sus maniobras.



Figura 3.11.- Mecanismo de encerrojamiento de un desvío convencional

Unos de los encerrojamientos clásicos que se han empleado ha sido aquel en el que su dispositivo de inmovilidad se encuentra en el interior del accionamiento, como, por ejemplo, el cerrojo Jüdel, aunque ya están en desuso. El dispositivo de encerrojamiento directo es aquel en el que se produce el acoplamiento directo e inmediato entre la aguja y la contraaguja, como el mostrado en la Figura 3.11. Los más importantes son el Carter-Coussinet, el cerrojo de garras y el cerrojo de uña, que es el que se está empleando actualmente en España. Este es un dispositivo no talonable, por lo que permite elevadas fuerzas de retención del accionamiento, el cual absorbe la totalidad de los esfuerzos dinámicos y estáticos, permitiendo una gran seguridad frente a averías simples. El dispositivo de encerrojamiento indirecto (como el cerrojo de balancín, de bielas articuladas o el de rombo) consiste en acoplar la aguja y la contraaguja mediante elementos solidarios a las partes que aseguran la disposición de la contraaguja, por lo que se requiere una gran estabilidad en el asentamiento relativo entre el sistema aguja-contraaguja y el dispositivo de encerrojamiento.

Las agujas son el elemento más representativo de un desvío. Las distintas definiciones correspondientes a las agujas vienen recogidas en ORE D-72 [18], siendo las más significativas la punta matemática (P.M.A.), la punta real (P.R.A.), el ángulo de desviación (Θ) y el ángulo de ataque, según se muestran en la Figura 3.12. Los diseños geométricos de las agujas son el tangente y el secante. El trazado tangente se suele emplear cuando no sea necesario introducir un sobreal ancho en la vía directa para permitir el paso de los vehículos, siendo empleado el trazado secante en los demás casos. En el primer caso se genera lo que se conoce como vientre de pez, siendo poco adecuado sobre el itinerario principal. El ángulo de desviación será máximo cuando la aguja sea recta, y mínimo (y en muchos casos nulo) en la aguja curva tangencial.

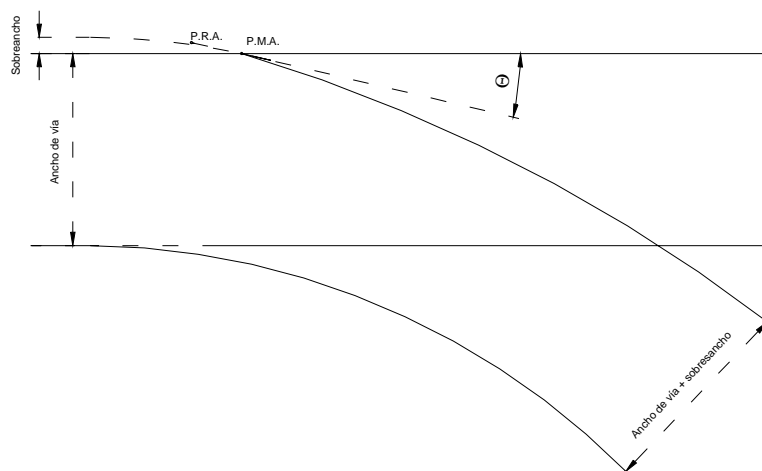


Figura 3.12.- Principales variables geométricas de los desvíos ferroviarios

La fijación del talón de la aguja ha de permitir la rotación de ésta evitando movimientos en las direcciones no deseadas, así como la unión con el carril siguiente y manteniendo la debida separación con la contraaguja. Una de las soluciones ha sido el empleo de una junta ordinaria cuyas bridas se aflojan y permiten el juego necesario para la maniobra (ya en desuso por el comportamiento variable según el apriete de las bridas y la aparición de holguras no deseadas). Empleando las agujas flexibles se evita que se tenga que emplear el pivoteo en el talón de la misma, pudiéndose por tanto elevar sus solicitaciones mecánicas. Para la unión del talón con el carril contiguo se emplea, principalmente, una brida de contención (actualmente en desuso) y la soldadura.

La construcción de las agujas fue, en un inicio, cepillando la cabeza y el patín de los carriles comunes, como los mostrados en el Anexo A1. Este procedimiento cayó en desuso debido a la pérdida de las principales propiedades mecánicas de la aguja y su resistencia a choques frontales. Los principales carriles que se emplearon fueron los Vignoles (o de patín), utilizándose actualmente los Brunels (ver Figura 3.13).

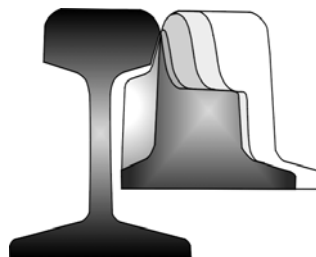


Figura 3.13.- Sección de aguja Brunel

Los tipos de perfiles empleados hoy en día son los simétricos y asimétricos (ver Figura 3.14). La elección de un tipo u otro vendrá condicionado por la rigidez transversal de la pestaña que se requiere, así como poder garantizar la garganta libre de paso requerida para permitir el paso de la pestaña en los casos más desfavorables. El perfil alto simétrico tienen mayor rigidez vertical, favoreciendo la resistencia ante cargas verticales, en especial en la zona flexible, realizándose la transición en su talón al perfil normal del carril mediante fresado. En el caso asimétrico se forja el talón de la aguja para permitir el paso de una sección simétrica baja a una alta, con la intención de poder soldarla al carril normal. El perfil bajo asimétrico permite un mejor acoplamiento con la contraaguja debido a una mejor distribución de su sección, evitando en muchos casos su mecanizado. Si el perfil es alto simétrico, simplemente se mecaniza el perfil especial, siendo en este tipo de perfil más fácil el efectuar laminación. Con el fin de reducir el esfuerzo de maniobra, se suele mecanizar el patín del perfil en la zona de flexión. El perfil bajo, tanto simétrico como asimétrico, permite la sujeción elástica interior de la contraaguja situada en el interior de la placa resbaladera. Ello favorece una mayor homogeneidad entre el cambio y la vía adyacente.

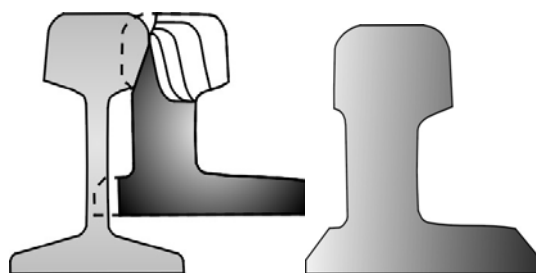


Figura 3.14.- Perfil de agujas asimétricos

Las zonas más características de la aguja según su función son las de protección de la punta, guiado exclusivo, guiado y apoyo compartido con la contraaguja y, guiado y apoyo exclusivo. La forma de conseguir las diferentes zonas se realiza, básicamente, mediante cepillado.

En los desvíos de Alta Velocidad se requiere una gran carrera de la aguja³, debido a la longitud elevada de las agujas. Ello hace que sea necesario emplear varios motores de accionamiento, como es el mostrado en la Figura 3.15. Los motores son eléctricos, y tienen la misión de abrir o cerrar el cambio de vía. Están conectados a un de control situada en la estación de tren que dirige el cambio de vía y suelen ser motores convencionales sin ninguna particularidad significativa.

³ Se entiende por carrera de la aguja al desplazamiento total de la barra de maniobra en el accionamiento de la aguja.

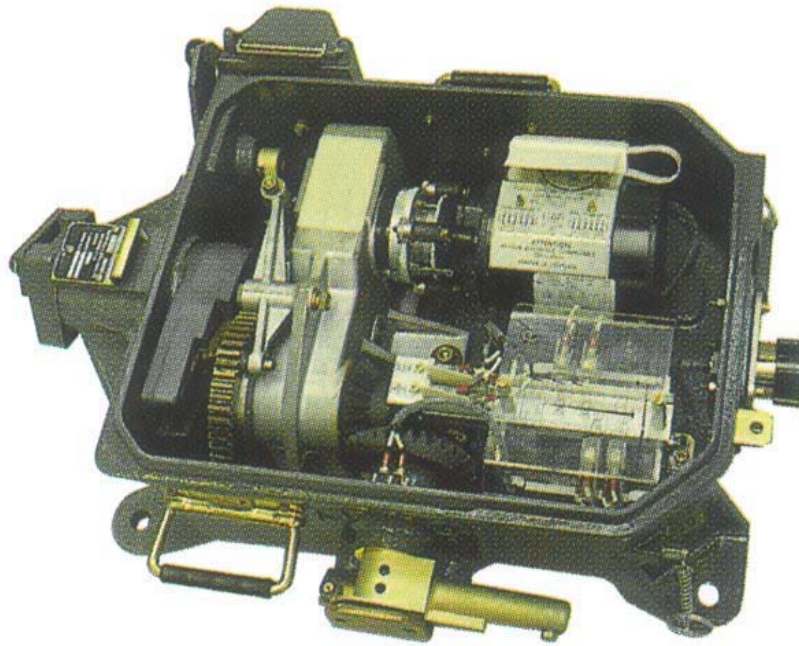


Figura 3.15.- Motor de accionamiento de agujas (Alston)

Los principales tipos de aguja son:

- *Aguja recta*, actualmente en desuso en la Unión Europea, aunque no así en América. Son muy resistentes y sencillas en la punta. Desde la punta hasta el talón la aguja es recta, comenzando la curva en el talón del espadín. La aguja se ve sometida a elevados esfuerzos debido al paso de los vehículos;
- *Aguja curva circular secante*, empleada principalmente cuando se precisa dotar un sobreaancho a la vía desviada. El hilo exterior de la vía desviada corta al de la principal en la punta de la aguja.
- *Aguja curva circular tangente con punta recta*, solución poco empleada en la actualidad. Es una solución buena para desvíos en curvas. La aguja es tangente a la correspondiente contraaguja en su representación geométrica. La punta de la aguja suele presentar problemas de fragilidad. Se suele sustituir el arco comprendido entre el punto de tangencia teórico hasta un punto del trazado director de la aguja, donde el espesor de ésta sea suficiente para garantizar su durabilidad.
- *Aguja curva circular (o de transición) tangente con punta achaflanada*, modelo similar al anterior pero con un ángulo de desviación más suave. Cuando la punta de la aguja es demasiado fina, se suele emplear un achaflanamiento o bisel. La aguja es curva, con alineaciones de aguja y contraaguja tangentes. Es el diseño más empleado actualmente, ofreciendo quitar mayor seguridad y confort al pasajero.

3.5 Evolución de los desvíos ferroviarios

Los primeros desvíos se desarrollaron, como ya se ha mencionado al inicio de esta sección, en 1796. Los diseños de estos primeros desvíos consistían en hacer móviles, alrededor de uno de sus extremos, los carriles que constituyen la bifurcación, de manera que se coloquen enfrentados a la vía que se trata de comunicar, como es el representado en la Figura 3.16. La ventaja principal de estos desvíos es que son aplicables a cualquier tipo de vías a enlazar. Las agujas podían ser de doble cabeza, siendo el eje de rotación un perno o pasador vertical que enrasa con la cara superior del carril, o bien una clavija en el cojinete de junta. Se suelen emplear carriles Brunel o Vignole: En los primeros, se colocan los carriles sobre una plancha de hierro que rota sobre uno de sus extremos sobre un disco de palastro, constituyendo de esta forma un eje de rotación real de aguja. En los segundos, la articulación se consigue mediante una junta floja, sin estar muy apretadas las bridas, constituyendo de esta forma un eje de rotación virtual. La principal ventaja de este tipo de desvíos es su robustez, aunque las desventajas más destacadas son el deficiente comportamiento de las soluciones de articulación de la aguja, como son los bulones, pasadores o juntas flojas, origen de frecuentes averías, y la imposibilidad de evitar el descarrilamiento en el caso de que un tren tomara el cambio de talón y para cuya vía no estuvieran debidamente colocadas las agujas.

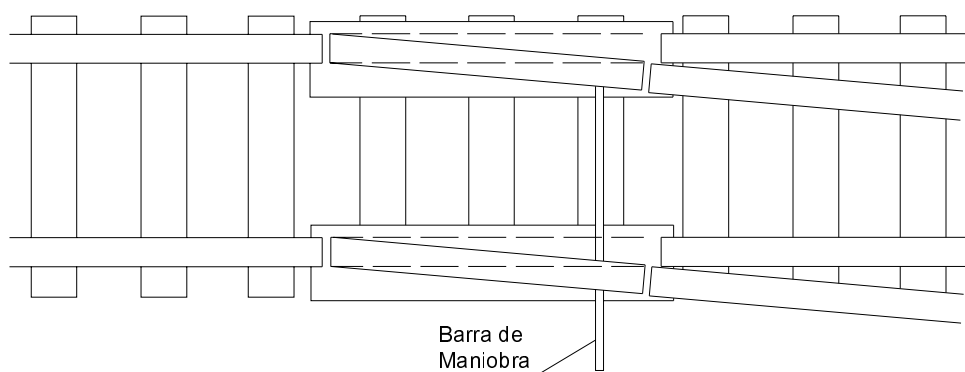


Figura 3.16.- Cambio de carriles móviles

En la primera mitad del siglo XIX, se modificó el modelo anterior, incorporando un contracarril más elevado que las agujas, consiguiendo con ello el talonamiento seguro del cambio. Este modelo es conocido como cambio Poiret. El desplazamiento de las agujas es como consecuencia directa del perfil de las pestañas de las ruedas, siendo éste su principal inconveniente, ya que una pestaña muy desgastada puede no desplazar a las agujas, y con ello se podría producir el descarrilamiento del tren. El eje de rotación de las agujas está constituido por la punta talón. Dicha disposición se sigue empleando en la actualidad.

Los cambios de contracarriles móviles, como el mostrado en la Figura 3.17, surgieron como consecuencia del intento de eliminar la discontinuidad de los carriles de la vía mencionado en el párrafo anterior, permitiendo con ello que las filas exteriores de los carriles del cambio sean continuas. Los carriles interiores se disponen de tal forma que permitan el paso de las pestañas de las ruedas del tren. El paso del tren de una vía a otra se consigue mediante dos contracarriles curvados en sus extremos y móviles alrededor de unos pernos o pasadores, siendo las agujas fijas. Dichos carriles tienen una determinada altura con respecto a la cabeza del carril, así como un plano inclinado en el extremo opuesto al eje de rotación para pasar del nivel del contracarril al del carril. En este tipo de desvíos se produce un excesivo desgaste de los contracarriles y holguras en el sistema de maniobra, pudiendo provocar el descarrilamiento del tren.

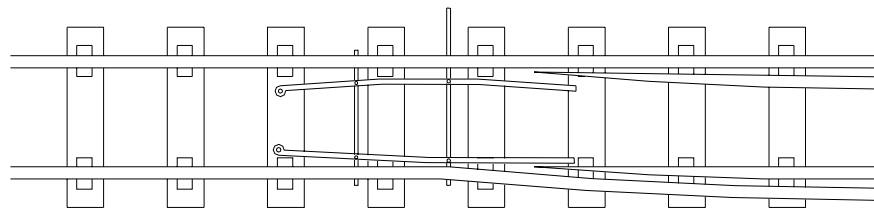


Figura 3.17.- Cambio de contracarriles móviles

Con la intención de paliar los problemas de desgastes que se dan en el cambio de contracarriles móviles, se optó por inmovilizar uno de los contracarriles y suprimir el opuesto. Este desvío es conocido como cambio de Stephenson de agujas desiguales (Figura 3.18). De esta forma, fue necesario alargar la aguja no protegida por el contracarril. Ésta era móvil alrededor de su talón mediante una articulación. El contracarril era curvado en sus extremos para guiar mediante la cara interior del mismo a las ruedas, protegiendo de esta forma la aguja móvil de los choques. Esto evitaba el descarrilamiento, ya que no se producía el contacto de las pestañas de las ruedas con la entalladura practicada en la contraaguja. La maniobra se verifica por medio de una palanca de contrapeso. La principal desventaja de esta disposición la constituye la aguja fija, ya que su punta es muy delgada y en ocasiones su sección no permitía soportar las cargas transmitidas por las ruedas del tren. Este problema se resolvió sustituyéndose una aguja móvil por la fija, siendo la móvil más corta (ver Figura 3.19).

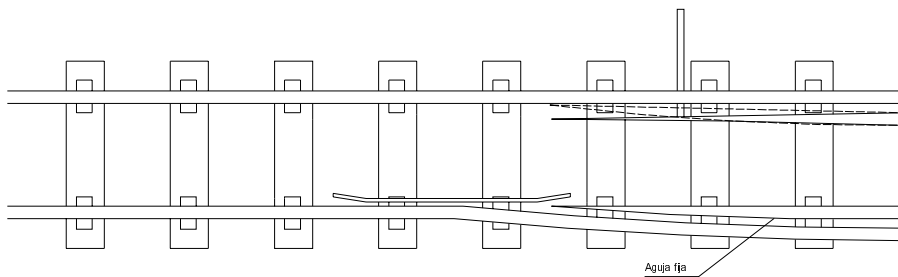


Figura 3.18.- Cambio de Stephenson de una sola aguja

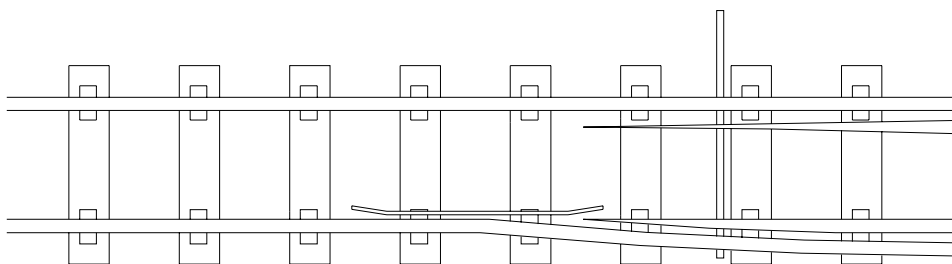


Figura 3.19.- Cambio de Stephenson modificado

El cambio de dos agujas móviles iguales surgió como consecuencia del desarrollo del cambio de Stephenson (ver Figura 3.20), y fue adoptado por la mayoría de las administraciones ferroviarias a mediados del siglo XIX.

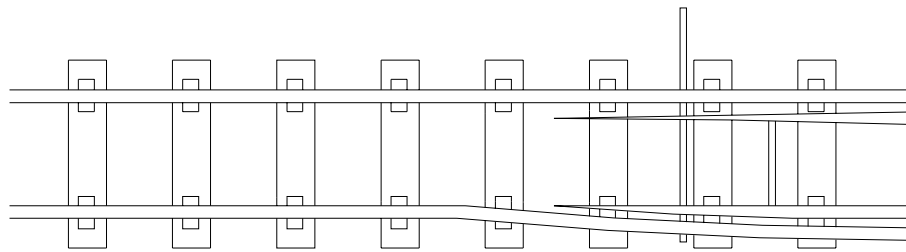


Figura 3.20.- Cambio de dos agujas móviles iguales

En un principio, las agujas de trazo recto presentan la principal desventaja de que al formarse un ángulo de ataque grande entre las ruedas y el carril de la aguja, se producen fuertes aceleraciones transversales y choques. Ello conlleva a elevados desgastes, constituyendo un factor de inestabilidad en el sistema, reduciendo la vida útil del desvío. Estos desvíos tenían las agujas con talón articulado, careciendo de un dispositivo de encerrojamiento de la punta de la aguja con mayores garantías que la palanca de contrapeso.

En 1886 se desarrollaron los cambios de aguja secantes. En ellos se incorporó una curva de perfil curvo, cuyo trazado intersecta el eje de la figura recta adyacente, conocido como aguja de intersección. Posteriormente se empleó el trazado de los cambios secantes, consiguiéndose éstos mediante la composición de varias curvas circulares.

El incremento de la longitud de los trenes, así como la velocidad que alcanzan, hizo que se desarrollaran los cambios de aguja tangentes y radios de desviación único. La curva de la aguja, que tiene el mismo radio que el de la vía desviada, continúa a través del cruzamiento, llegando en algunos casos incluso a superar el final real del desvío. Este tipo de desvíos lleva un sistema de doble sujeción, fijando las placas rígidas de asiento a la traviesa mediante tirafondos, y los carriles a la placa mediante grapas de acero, arandelas elásticas y tornillos. Una característica importante en estos desvíos es su flexibilidad geométrica, pudiéndose emplear en curvas circulares o de transición, aunque para velocidades elevadas se ha comprobado que el mantenimiento del aparato es complicado. El punto más vulnerable del desvío lo constituye la sección recta tangente de la punta de la aguja, por ser éste el origen del ataque de las ruedas del tren. Esto se puede solucionar cortando la punta de la aguja curva en un punto donde pudiera tener un espesor crítico. A este tipo de agujas se le ha denominado de punta achaflanada. Con ello se consigue reducir el ángulo de desviación de la misma. Este

trazado fue ratificado por el Comité de Expertos D 72 de la Oficina de Investigación y Ensayos de la OIC en 1969 [17], aunque los Ferrocarriles Holandeses emplearon desvíos con agujas con trazado tangente, con achaflanamiento en las puntas de las mismas y dos radios diferentes de curvatura en el desvío. Algunas de las disposiciones más comunes vienen representadas en la Figura 3.21.

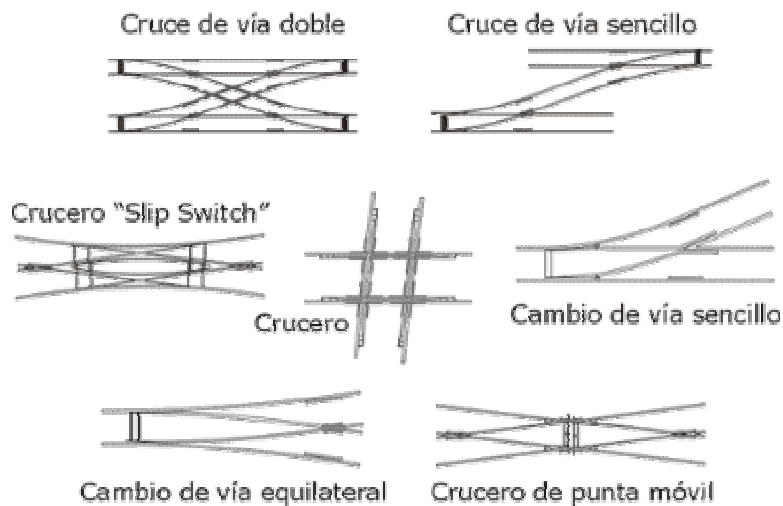


Figura 3.21.- Disposiciones más comunes de los desvíos ferroviarios [1]

3.6 Nuevas tendencias en el diseño de los desvíos ferroviarios

La incorporación de la alta velocidad al sistema de transporte ferroviario hace que sea necesario introducir nuevos diseños en los desvíos ferroviarios (ver Figura 3.22). Éstos requieren agujas más largas, de grandes radios de curvatura.

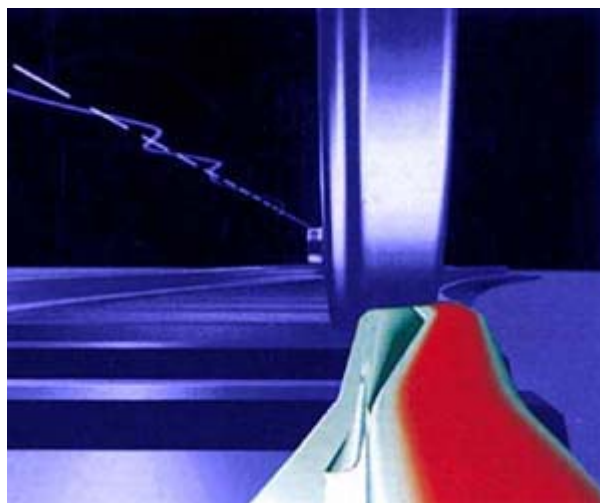


Figura 3.22.- Estudio cinemático del paso de la rueda por el desvío (VAE [35])

La incorporación de clotoideas (parábolas cúbicas) en la geometría de la vía desviada hace que sea posible eliminar los problemas de la discontinuidad en la dirección y en las aceleraciones transversales. Nuevos diseños, como, por ejemplo, Schwiag, hace que la distribución de esfuerzos verticales, longitudinales y transversales sea lo más continua posible, con el fin de evitar puntos singulares por exceso de rigidez o de elasticidad. En dicho diseño, se sujeta elásticamente la contraaguja en el lado del patín situado bajo la aguja de perfil bajo, con la posibilidad de soldar el desvío entero a la vía. También se está introduciendo la solución de ubicar los accionamientos de las agujas en cajones metálicos a modo de traviesas, los cuales tienen un asentamiento similar al resto de las longrinas, manteniendo una elasticidad vertical homogénea y facilitan el bateo bajo el desvío.

Con el fin de evitar la discontinuidad en el cambio de rodadura de la rueda, y con ello disminuir las perturbaciones en el movimiento de los órganos de rodadura de los trenes, los cuales podrían generar movimientos de ataque de los ejes guiadores sobre la aguja recta, se han desarrollado los procedimientos de Fakop y Caftersan [29]. El primero consiste en desplazar lateralmente la contraaguja recta, dando una geometría adecuada con el propósito de evitar el ataque de la aguja curva. El segundo consiste en mecanizar localmente parte de la tabla de rodadura de la contraaguja recta, evitando en esa zona el contacto con la rueda, y evitando el ataque sobre la aguja recta. En la Tabla 3.4 se muestran las representaciones más habituales de los tipos de desvíos.

Agujas Rectas	Agujas Curvas	Hilos Curvos del Corazón	Tipos de Desvío
2	0	0	Desvío con cambio de agujas rectas y cruzamiento recto
1	1	0	Desvío recto con cruzamiento recto
1	1	1	Desvío recto con cruzamiento curvo
0	2	0	Desvío curvo con cruzamiento recto.
0	2	2	Desvío curvo con cruzamiento curvo.

Tabla 3.4.- Combinaciones de tipos de cambio y cruzamiento

3.7 Tipos de desvío empleados en España

Los desvíos más destacados empleados en España son los tipo A, B, C y V, para un ancho de vía de 1.668 mm, conocido como vía ancha (ver Anexo A2 y Anexo A3). La denominación de los distintos tipos de desvíos corresponden a las iniciales de antiguo, bueno, calidad y velocidad respectivamente.

Los desvíos tipo A se han instalado en España hasta finales de la década de 1980. La velocidad de circulación del tren en dichos desvíos está limitada a 140 km/h en vía directa y 30 km/h en vía desviada. Sus corazones no admiten la soldadura a la barra larga soldada, por lo que es necesario intercalar aparatos de dilatación antes y después del desvío.

Los desvíos tipo B se componen por tres modelos distintos. El primer tipo posee un corazón soldado a cupones de unión, los cuales se pueden soldar aluminotérmicamente a la barra larga soldada. El segundo tipo tiene un corazón embriagado y encolado a cupones de unión, pudiéndose soldar aluminotérmicamente a la barra larga soldada. El último tipo emplea un corazón que se puede embridar y encolar directamente a la barra larga soldada, siendo su longitud más reducida que los anteriores. Los desvíos tipo B permiten una velocidad de paso del tren en vía directa de 140-160 km/h y de 30-60 km/h en vía desviada, según el modelo.

Los desvíos tipo C permiten una velocidad de paso del tren de 200 km/h en vía directa, y de 45-60 km/h en vía desviada, según el modelo. Se suelen asentar en traviesas de madera o de hormigón.

Los desvíos tipo V permiten una velocidad de paso del tren en vía directa de 200 km/h y de 100-130 km/h en vía desviada, según el modelo. Este tipo de desvío se asienta en traviesas de madera.

Para un ancho de vía internacional, se han modificado los desvíos tipos A, B, C, V, e incorporado el nuevo tipo AV, cuyo nombre corresponde a las iniciales de alta velocidad (ver Anexo A2). Dichos desvíos vienen recogidos en las normas del subgrupo 3-6 (Desvíos), 7-1-3.5 (Montaje de la vía: Montaje de desvíos y de otros aparatos de vías), 7-3-3.X (Clasificación de la vía montaje de la vía: Desvíos), 7-5-2.5 (Conservación de la vía: Amolado de las superficies de vía) y 7-5-3.1 (Conservación de la vía: Mantenimiento de desvíos y de otros aparatos de vía) de RENFE.



Figura 3.23.- Desvío de Alta Velocidad (JEZ)

En los desvíos tipo A, al igual que los desvíos tipo B y C, se aprovechan los corazones de los desvíos tipo A de vía ancha (ver Anexo A2). La velocidad máxima es de 100 km/h y 30 km/h por vía directa y desviada respectivamente, siendo estas velocidades máximas de 160 km/h y de 40-60 km/h para vías directas y desviadas respectivamente para los desvíos tipo B, asentándose en este último caso sus vías sobre traviesas de madera. Los desvíos tipo C admiten velocidades de 200 km/h y de 45-85 km/h para vías directas y desviadas respectivamente, asentándose sus vías sobre traviesas de madera, salvo en algunos casos que se hace sobre traviesas de hormigón. Los desvíos tipo V admiten velocidades de 200 km/h por vía directa y de 100 km/h por vía desviada, y su asiento se da sobre traviesas de madera.

Los desvíos tipo AV consta de corazones de punta móvil, similar al mostrado en la Figura 3.3, siendo las velocidades por vía directa hasta 250 km/h. El modelo I tiene una longitud aproximada de 132 m, y permite una velocidad en la vía desviada de 160 km/h. Posee una geometría conocida como clotoide de meseta, ya que su diagrama de curvatura tiene la forma de una meseta. El accionamiento de las agujas se consigue empleando 8 motores individuales, y el movimiento del corazón se realiza empleando 3 motores, también individuales. El modelo II permite una velocidad de circulación por la vía desviada de 80 km/h. Para el accionamiento de agujas se emplean 3 motores individuales, y para el movimiento del corazón flexible 2. El asiento en ambos modelos se realiza sobre traviesas de hormigón, empleando un sistema Fakop en sus cambios. En la Figura 3.23 se representa un desvío AV modelo II.

La gran longitud de los cambios obliga a utilizar motores independientes para el accionamiento de las agujas, como se comentaba anteriormente, que en el caso de estos desvíos de altas prestaciones llega al número de 8. A fin de facilitar las labores de instalación y bateo, se utilizan cerrojos instalados en traviesas cajón. En la línea Madrid-Barcelona-Frontera se ha utilizado como novedad el cerrojo HRS, que levanta ligeramente la aguja durante la maniobra, facilitando la misma y alcanzando una fuerte reducción de los gastos de mantenimiento.

En esta línea, el grupo VAE que se ha desarrollado el nuevo sistema Hydrostar. Este tipo de accionamiento ha sido montado en un cambio de vía de alta velocidad con 8 accionamientos como demostración a la empresa pública española administradora de infraestructura ferroviaria GIF. Este sistema ha sido homologado en Austria y Alemania, por las empresas respectivas de transporte ferroviario ÖBB y DB. Consiste en un conjunto integrado que elimina la presencia de múltiples motores sustituyéndolos por una única bomba oleodinámica que mueve los diferentes puntos de accionamiento mediante conexiones en serie. Cada punto de accionamiento consta de una unidad estanca que integra maniobra, encerrojamiento y detección, y está montada en una traviesa cajón. Dichas unidades, que son autoajustables e intercambiables fácilmente, son iguales a lo largo de todo el cambio. Debido a su estanqueidad se eliminan gran parte de los costes de mantenimiento típicos de los sistemas

convencionales, garantizándose altos niveles de fiabilidad, movimiento síncrono de todos los puntos de la aguja, facilidad de maniobra manual en caso de fallo de fluido eléctrico e integrabilidad en cualquier sistema de señalización y seguridad. Se ha eliminado la necesidad de engrase de sus elementos y la posibilidad de fugas de aceite al exterior por medio de un ingenioso sistema de recogida.

La empresa española JEZ Sistemas Ferroviarios está fabricando los desvíos ferroviarios para la línea Madrid-Barcelona-Frontera. Son desvíos concebidos para una velocidad de paso por vía directa de 350 km/h y para tres velocidades de paso por vía desviada, 100 km/h, 160 km/h y 220 km/h, en función de las diferentes necesidades existentes dentro de la línea. Ello ha dado lugar a tres tipos de desvíos, con tangentes de 1:22, 1:36.9 y 1:50 respectivamente. Con el objetivo de lograr una confortabilidad máxima en el paso de vía directa a vía desviada, en conjunción de bajos esfuerzos para el propio aparato de vía, se ha elegido un diseño geométrico de clotoide de meseta, conformado por dos segmentos de clotoide y un arco intermedio. Esta geometría, que ha sido optimizada utilizando el programa informático Nucars [3], permite la máxima confortabilidad de paso con valores mínimos del esfuerzo lateral a que se ve sometida la vía, lo cual redundará en muy bajos costes de mantenimiento. Se ha previsto montar estos desvíos en escapes con amplias entrevías, 4,7 metros, dadas las altas velocidades de circulación previstas.

En los desvíos ferroviarios que se están empleando en la línea Madrid-Sevilla (ver Figura 3.24), se han dotado a los cambios del sistema, desarrollado por VAE, Fakop. Asimismo se ha dotado al cambio de un sistema de resbalamiento por rodillos, también desarrollado por VAE.

La empresa alemana Hanning & Kahl, representado en España por Pasch, de sistemas de seguridad para el tráfico urbano, ha suministrado hasta ahora los accionamientos de agujas de desvíos para las líneas de los tranvías de Valencia, A Coruña, Bilbao y Barcelona. Esta empresa ha desarrollado accionamientos eléctricos con cerrojos para carril de cargante y para carril Vignole, así como los mandos para talleres y cocheras. También ha fabricado sistemas oleodinámicos de frenado gobernados por microprocesador, equipos hidráulicos, actuadores y sistemas de desbloqueo de emergencia, así como sistemas de diagnóstico para accionamiento de desvíos, del tipo Wedis.



Figura 3.24.- Construcción de un desvío de AV para ser instalado en la línea Madrid-Sevilla

Algunas de las últimas mejoras más destacadas aplicadas a los desvíos ferroviarios son las siguientes: Desvíos de alta velocidad elásticos, toperas frenantes, desarrollo de carriles muy largos, sin soldadura, que pueden medir hasta 120 m, el carril con perlitzado fino de la cabeza del carril HSH, calefactores para desvíos con controles automáticos de temperatura y de humedad (ver Figura 3.25), etc.



Figura 3.25.- Desvío ferroviario provisto de sistema de calefacción

3.8 Análisis del mercado de los desvíos ferroviarios

El mercado de los desvíos ferroviarios en la Unión Europea, y más concretamente en España, presenta unas características peculiares desde el punto de vista de la oferta y la demanda, así como de la estructura del mercado. En esta sección se analizarán cada uno de los campos mencionados, así como otras características que determinan dicho mercado.

Las cuotas en el mercado nacional de cruces y desvíos viene recogida en la Tabla 3.5, correspondiente al año 2001 [30] y [31].

Empresa	Cuota de mercado (%)
Jez (VAE)	25 - 30
Amurrio (Cogifer)	25 - 30
Duro Felguera	15 - 20
Alegría	15 - 20
Otros	10 - 15
Total	100

Tabla 3.5.- Mercado español de cruces y desvíos ferroviarios en 2001

Amurrio Ferrocarril y Equipos, S.A. (Amurrio) es una sociedad conjunta controlada por Cogifer, S.A. y Talleres de Amurrio S.A. Cogifer es un grupo francés, quien compite en el mercado internacional, que posee el 50 % (adquiridos en 1995) de Amurrio, y Talleres de Amurrio, S.A. es un fabricante nacional de desvíos ferroviarios, que posee el 50 % restante. En la Tabla 3.5, otros hace referencia a empresas como Balfour Beatty, VAE- BWG y Cogifer, S.A., cuando en estas últimas no intervienen las empresas JEZ o Amurrio respectivamente. VAE AG tiene el 50 % del capital social de JEZ, adquiridos en 1994. Duro Felguera es una sociedad española fabricante de maquinaria y de instalaciones industriales, líder del mercado. Alegría es una empresa que fabrica y comercializa desvíos y cruces ferroviarios, aunque también fabrica puentes metálicos y trabaja en el sector del mantenimiento de vagones.

En breve, según indica el informe SCD N-273 [31], la empresa VAE Holding GMBH será controlada en su totalidad por Voestalpine AG, que posee el 90,6 % de VAE AG (el resto de las acciones cotizan en el mercado de la Bolsa de Viena), que a su vez es en la actualidad una sociedad conjunta con el reparto de su capital social al 50 % entre las empresas Voestalpine AG y Vossloh AG. Vossloh tomará el control de Cogifer, S.A. y Cogifer Travaux Ferroviaires, como se indica también en el mencionado informe. Voestalpine AG es un conglomerado industrial cuyas acciones cotizan en la Bolsa de Viena, y cuyo accionista mayoritario es el gobierno austriaco con el 34,7 % de las acciones del grupo a través de la sociedad holding

Öiag, estando el resto de las acciones en manos de particulares en cotización libre en dicha Bolsa.

VAE AG fabrica y comercializa cruces y desvíos ferroviarios en el mercado español mediante JEZ Sistemas Ferroviarios, S.L. y Burbiola, S.A. Ésta es una sociedad conjunta a partes iguales entre VAE AG y Talleres y Fundiciones JEZ, S.A. Voestalpine AG desarrolla sus actividades en España a través de VAE AG en el mercado de los desvíos y cruces ferroviarios.

Vossloh AG pasará a adquirir el 100 % de las acciones de las sociedades Cogifer, S.A. y Cogifer Travaux Ferroviaires, mediante un Contrato de Compraventa firmado el 15 de julio de 2002 entre Vossloh y la Société Industrielle du Hanau, S.A., según se indica en el informe SDC N-272 [30]. Actualmente Vossloh AG, sociedad alemana que trabaja en los mercados de iluminación y ferrocarril a nivel internacional, cotiza en las Bolsas de Frankfurt, Dusseldorf y XETRA. La familia Vossloh y la compañía Deutscher Herald poseen el 46 % del total de las acciones. Vossloh AG, dentro de su competencia ferroviaria, fabrica y comercializa sujeciones de vías, desvíos y cruces ferroviarios, sistemas informáticos de gestión de tráfico ferroviario y locomotoras diesel. Société Industrielle du Hanau, S.A. posee casi la totalidad de las acciones, el 99,99 %, de Cogifer, S.A. y Cogifer Travaux Ferroviaires, aunque pasará a adquirir 100 % de dichas acciones, las cuales posteriormente serán vendidas a Vossloh AG a través de la sociedad francesa holding De Dietrich.

Atendiendo a la Tabla 3.5, Vossloh, considerando el mercado español de cruces y desvíos ferroviarios, adquirirá el 28,3 % de Amurrio. Con ello será la empresa líder del mercado, con una cuota aproximada del 56,6 %.

En la Tabla 3.6 se indican las facturaciones de las empresas Vossloh AG, Cogifer, S.A., Cogifer Travaux Ferroviaires, Voestalpine AG y VAE AG, correspondientes a los ejercicios de 1999, 2000 y 2001, y los ámbitos nacionales, de la Unión Europea y Mundial, conforme a los criterios previstos en el artículo 3 del Real Decreto 1443/2001.

Desde el punto de vista de la demanda, el mercado se centra básicamente en dos clientes finales, que son RENFE [20] y GIF [10]. RENFE es el responsable de la renovación y del mantenimiento de las líneas ferroviarias existentes en el país, sin incluir las líneas de alta velocidad. GIF es la entidad pública responsable del trazado, planificación y construcción de nuevas líneas, incluyendo en éstas las líneas de alta velocidad. Por lo general se llevan a cabo licitaciones públicas para la renovación y mantenimiento de las líneas de ferrocarril ya existentes, o la construcción de nuevas líneas de ferrocarril. En dichas licitaciones participan contratistas, como son las empresas Ferrovial, FCC, etc. Estas compañías, tras la adjudicación de la licitación, licita el suministro de los desvíos y cruces a las compañías que lo construyen o distribuyen mencionadas en los párrafos anteriores. Así pues, las redes de distribución de este

producto no existen, ya que estos se producen bajo encargo y conforme a las especificaciones técnicas requeridas por las empresas demandantes, y se distribuyen directamente del fabricante al cliente. Ello hace también que no haya un precio prefijado de estos productos.

Empresa	Ejercicio	Internacional	Unión Europea	España
Vossloh AG	1999	790,1	< 250	< 60
	2000	854,4	< 250	< 60
	2001	903	< 250	< 60
Cofiger, S.A.	1999	156,4	< 250	< 60
	2000	145,3	< 250	< 60
	2001	178,7	< 250	< 60
Cogifer Travaux Ferroviaires	1999	177,6	< 250	0
	2000	168,4	< 250	0
	2001	166,1	< 250	0
Voestalpine AG	1999	2711,7	> 250	< 60
	2000	31166,1	> 250	< 60
	2001	3353,7	> 250	< 60
VAE AG	1999	306,3	< 250	< 60
	2000	290,6	< 250	< 60
	2001	321	< 250	< 60

Tabla 3.6.- Volumen de ventas de las empresas más destacadas en los sectores de los cruces y desvíos ferroviarios (millones de Euros)

El resto de las compañías demandantes a nivel nacional, aunque menos importantes desde el punto de vista de la demanda, son las distintas compañías de metro, operadores ferroviarios de titularidad pública y de carácter local, como es el caso de FEVE, y otras compañías industriales.

Referencias

- [1] *Announces Environment Acquisition Technology*, <http://www.aeat.com>
- [2] *Cambios de vía S.A., DAMY*. <http://www.damy.com>
- [3] DeLorenzo, M., *NUCARS Modeling of a Freight Locomotive with Steerable Trucks*, Master's Thesis, Mechanical Department, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [4] *Directiva 2001/12/CE del Parlamento Europeo y del Congreso, de 26 de Febrero de 2001, por la que se Modifica la Directiva 91/440/CEE sobre el Desarrollo de los Ferrocarriles Comunitarios*, *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 75 de 15 de Marzo de 2001, SIN 1012-9200.
- [5] *Directiva 2001/13/CE del Parlamento Europeo y del Congreso, de 26 de Febrero de 2001, por la que se Modifica la Directiva 91/440/CEE del Consejo sobre Concesión de Licencias a la Empresas Ferroviarias*, *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 75 de 15 de Marzo de 2001, SIN 1012-9200.
- [6] *Directiva 2001/14/CE del Parlamento Europeo y del Congreso, de 26 de Febrero de 2001, Relativa a la Adjudicación de la Capacidad de Infraestructura Ferroviaria, Aplicación de Cánones por su Utilización y Certificación de la Seguridad*, *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 75 de 15 de Marzo de 2001, SIN 1012-9200.
- [7] *Directiva 91/440/CEE del Consejo, de 29 de julio de 1991, sobre el desarrollo de los ferrocarriles comunitarios*, DO L 237 de 24/08/1991.
- [8] *Directiva 95/18/CE del Consejo, de 19 de junio de 1995, sobre concesión de licencias a las empresas ferroviarias*, DO L 143 27.06.1995.
- [9] *Directiva 95/19/CE del Consejo sobre la adjudicación de las capacidades de la infraestructura ferroviaria y la fijación de los correspondientes cánones de utilización*, DO L 143 de 27.6.1995.
- [10] *Ente Gestor de Infraestructura Ferroviaria, GIF*. <http://www.gif.es>
- [11] **García Márquez, F.P.**, Pedregal Tercero, D.J., and Schmid, F. *Inversiones en el Sector del Transporte Ferroviario en la UE y su Influencia en el Mercado de los Desvíos Ferroviarios*, "Investigaciones Económicas", en revisión.
- [12] García, J.M y Rodríguez, M. 1995 . *Desvíos Ferroviarios*. Ingeniería Cantabria, S.A.
- [13] *International Railway Union, UIC*: <http://www.uic.asso.fr>
- [14] Mirabadi A., Sandidzadeh M.A., Hosseingholian, Schmid F. *Fault Tolerant Train Navigation System Via Integration of GPS, Balises, Tachometers and Doppler Radar*, 2002 Conference Proceedings, AREMA 2002 Annual Conference & Exposition in Washington DC (USA).
- [15] *Modular System for Reliability and Maintainability Management in European Rail Transport*. <http://remain.iitb.fhg.de>
- [16] Moubray, J. *Reliability Centred Maintenance (RCM-II)*, Butterworth Heinemann, Oxford, 1997.

- [17] ORE. 1969. Question D 72. *Principes Directives pour la Conception des Appareils de Voire* (Profile de Rails UIC 54 et UIC 60). ORE, Utrech, Rapport Final.
- [18] *Question D 72. Principes Directeurs pour la Conception des Appareils de Voie (Profile de Rails UIC 54 et UIC 60)*. 1969. ORE, Utrech, Rapport 1.
- [19] *Real Decreto 613/1997, de 25 de abril, por el que se aprueba el estatuto del ente público Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF)*, B.O.E. de 29 de abril de 1997.
- [20] *Red Nacional de Ferrocarriles Españoles*. <http://www.renfe.es>
- [21] *Reglamento (CEE) n° 1893/91 del Consejo de 20 de junio de 1991 por el que se modifica el Reglamento (CEE) n° 1191/69 relativo a la acción de los Estados miembros en materia de obligaciones inherentes a la noción de servicio público en el sector de los transportes por ferrocarril, por carretera y por vía navegable*, DO L 169 de 29/06/1991.
- [22] *Reglamento (CEE) n° 1107/70 del Consejo, de 4 de junio de 1979, relativo a las ayudas concedidas en el sector de los transportes por ferrocarril, por carretera y por vía navegable*, DO L 130 15.06.1970.
- [23] *Reglamento (CEE) n° 1191/69 del Consejo, de 26 de junio de 1969, relativo a la acción de los Estados miembros en materia de obligaciones inherentes a la noción de servicio público en el sector de los transportes por ferrocarril, por carretera y por vía navegable*, DO L 156 28.06.1969.
- [24] *Reglamento (CEE) n° 1192/69 del Consejo, de 26 de junio de 1969, relativo a las normas comunes para la normalización de las cuentas de las empresas ferroviarias*, DO L 156 28.06.1969.
- [25] *Reglamento n° 11 relativo a la supresión de discriminaciones en materia de precios y condiciones de transporte, en aplicación del apartado 3 del artículo 79 del Tratado constitutivo de la Comunidad Económica Europea*, DO P 052 16.08.1960.
- [26] *Reliability Centred Maintenance Approach for Infrastructure and Logistics of Railway Operation*. www.datsi.fi.upm.es/~rail
- [27] Roberts, C., Dassanayake, H., Lehrasab, N. and Goodman, C., *Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: railway junction case study*, IFAC Control Engineering Practice, April 2002, vol. 10, no. 4, pp 419-429.
- [28] Roberts, C. and Fararooy, S. *Remote Condition Monitoring into the Next Millennium*. Proceedings of Computer Aided Design. Manufacture and Operation in Railway, 1998.
- [29] Rodríguez, M.D. and García, J.M., *Verso il Progetto Ottimizzato dei Deviatoi Ferroviari*, Edita dal Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani (CIFI), Roma, N° 4 Aprile 2002.
- [30] Secretaría de Estado de Economía, Dirección General de Defensa de la Competencia, 2002. *Informe del Servicio de Defensa de la Competencia, N-272 Vossloh/Cogifer*, Ministerio de Defensa.
- [31] Secretaría de Estado de Economía, Dirección General de Defensa de la Competencia, 2002. *Informe del Servicio de Defensa de la Competencia, N-273 Voestalpine/VAE*, Ministerio de Defensa.

- [32] Shimonae, T., Kawakami, T., Miki, H., Matsuda, O. and Takeuchi, H. 1991. *Development of a Monitoring System for Electric Point Machines*, IRSE Aspect Int. Conf., pp. 395-401.
- [33] *Technical Description of the VA Roadmaster 2000*, VAE Aktiengesellschaft, 1992.
- [34] *Tratado constitutivo de la Comunidad Europea*. Roma, 25 de marzo de 1957.
<http://europa.eu.int/abc/obj/treaties/es/estoc.htm>
- [35] *Voest Alpine Eisenbahnsysteme*. VAE. <http://www.vae-ag.com>

Anexo A1. Perfiles de carriles

A1.1 Perfil del carril UIC54

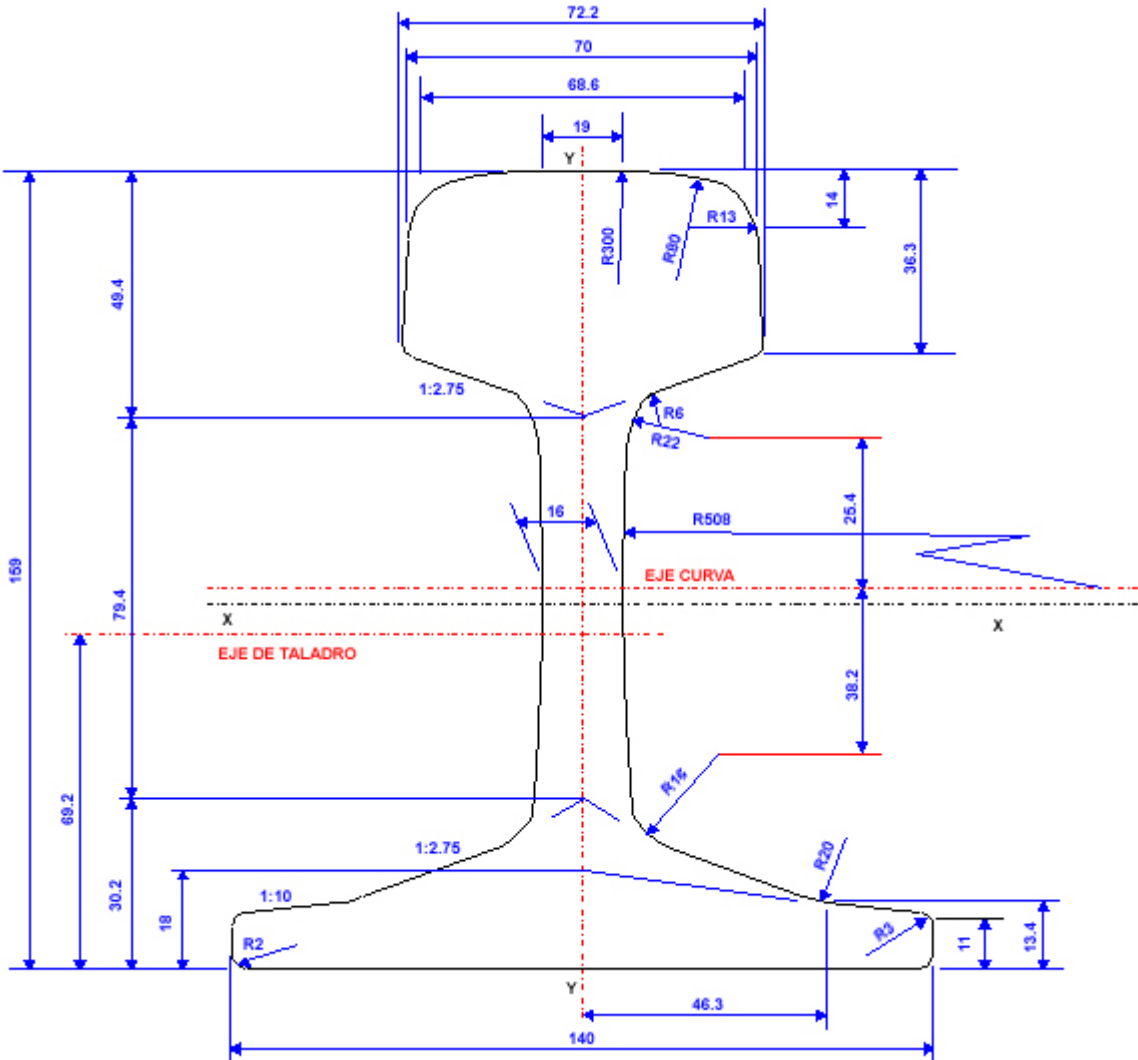


Figura A1.1.- Perfil del carril UIC54

DATOS TÉCNICOS - UIC54		
Sección	S	69,34 Kg/cm ²
Peso	P	54,43 Kg/m
Momento de inercia	I _x	2.346,0 cm ⁴
Momento de inercia	I _y	417,5 cm ⁴
Módulo resistente	I _x /V	279,2 cm ³
Módulo resistente	I _y /V	59,6 cm ³

Tabla A1.1.- Características principales del carril UIC54



Tabla A1.3.- Características principales del carril UIC54B

A1.4 Perfil del carril UIC60

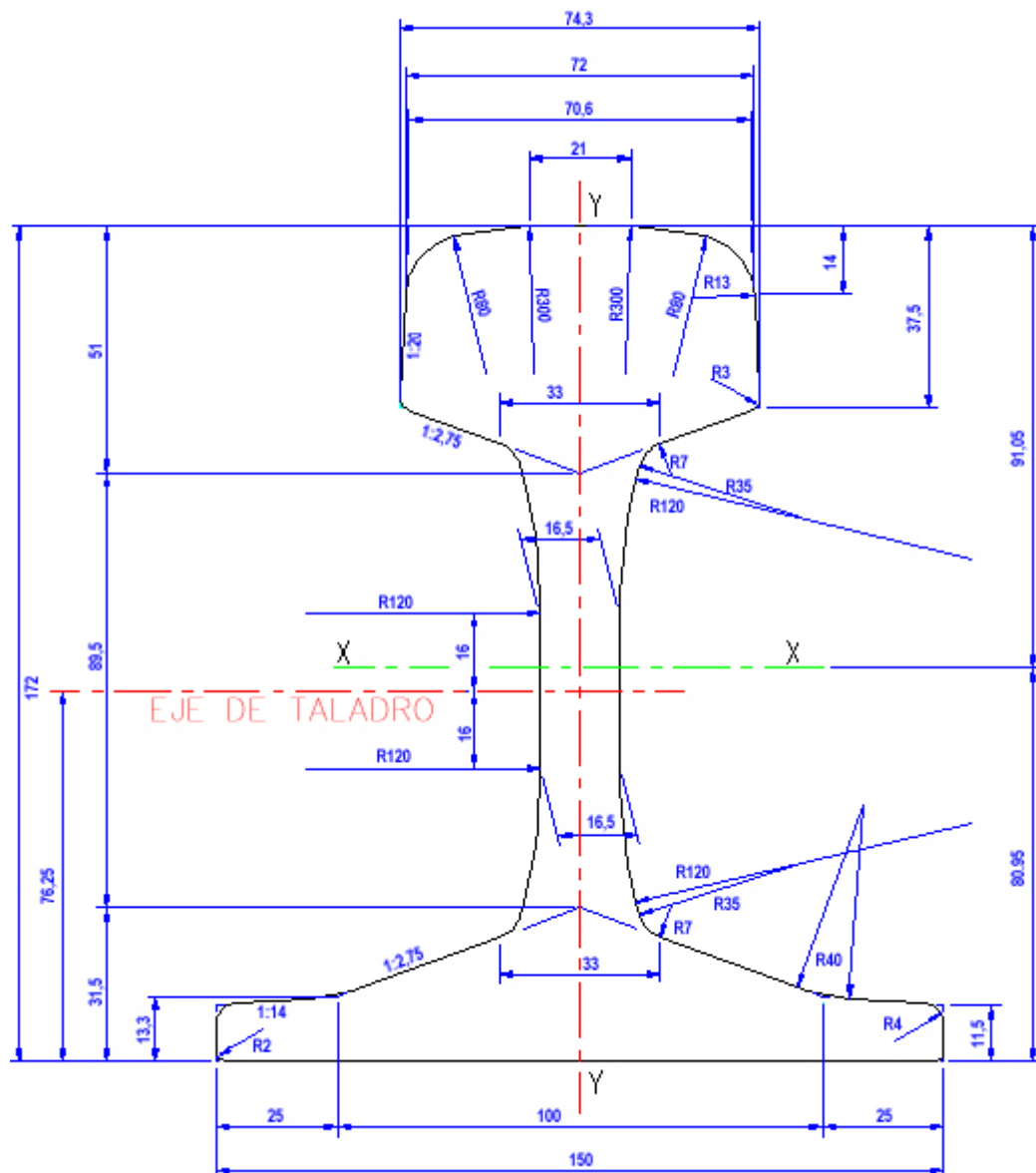


Figura A1.4.- Perfil del carril UIC60

DATOS TÉCNICOS - UIC60		
Sección	S	76,86 cm ²
Peso	P	60,34 Kg/m
Momento de inercia	I _x	3.055,0 cm ⁴
Momento de inercia	I _y	512,9 cm ⁴
Módulo resistente	I _x /V	335,5 cm ³
Módulo resistente	I _y /V	68,4 cm ³

Tabla A1.4.- Características principales del carril UIC60



Tabla A1.5.- Características principales del carril UIC60B

Anexo A2. Características básicas de los desvíos tipo A, B, C, V y AV

A2.1 Desvíos ancho 1.435 mm y carril UIC54

	CARACTERÍSTICAS	TIPO A	TIPO B	TIPO C
G E N E R A L E S	Tangente del ángulo de cruzamiento	0,09CR; 0,11CR; 0,11CR acortado	0,09CR; 0,09CC; 0,11CR; 0,075CR	0,09CR; 0,125CC; 0,071CR; 0,085CC
	Ancho de vía en el cruzamiento	1.435 mm	1.435 mm	1.435 mm
	Velocidad máxima por vía directa	140 km/h	160 km/h	200 km/h (0,11 - 160 km/h)
	Traviesas	Madera	Madera	0,09CR/0,11CC madera y hormigón, el resto sólo en madera
	Disposición de traviesas	Perpendicular a la vía directa y a la bisectriz del cruzamiento	Semiabanico	Abanico
	Tipo de sujeción	Rígida	Rígida combinada con elástica indirecta SLK-12	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag
	Relación con vías adyacentes	Juntas embridadas	Incorporable a la vía sin juntas (barra larga)	Soldable
	Geometría de la vía desviada en desvío recto	Circular de 2 radios, 1 radio en el acoplado	0,09CR Circ. 1 radio; 0,11CR y 0,75CR Circ. 2 radios; 0,09CC Circ. 3 radios	Circular de 1 radio
	Inclinación de carriles	1:20	1:20	1:20
	Protección con aparato de dilatación	Sí	No	No
C A M B I O	Velocidad máxima por vía desviada	30 km/h	50, 40, 55 y 60 km/h respectivamente	45, 45, 50, 60 y 60 km/h respectivamente
	Tipo de agujas	Elásticas	Elásticas	Elásticas
	Trazado de aguja	Secante	0,09CR y 0,11CR Secante; 0,75CR y 0,09CC Tangente	Tangente
	Perfil de aguja	Carril normal con refuerzo	Normal con refuerzo o especial alto asimétrico	Bajo asimétrico
	Sujeción	Tirafondos	Tirafondos con arandelas Grower	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag

	Dispositivo de protección contra el descuadre	Almohadillas	Almohadillas	Muñón y horquilla
	Relación de aguja en su talón con vías adyacentes	Juntas embridadas	Soldada	Soldada
C	Tipo	Monobloque de acero al manganeso	Monobloque o bloque central de acero al manganeso	Bloque central de acero al manganeso
O	Relación con vías adyacentes	Embridado mediante colas de milano	Soldado	Soldado
R		Tirafondos	Elástica indirecta SKL-12	Elástica indirecta SKL-12
A		UIC-33	UIC-33	UIC-33
C	Perfil	Acodado al corazón		Palastro al corazón eléctricamente
Z	Relación con el corazón	Directa a la traviesa	Con soporte único carril-contracarril	Con soporte único carril-contracarril
A	Sujeción del contracarril			
O	Sujeción del carril	Tirafondos	SKL-12	Exterior SKL-12, interior Schvihag

Tabla A2.1.- Descripción de los desvíos de ancho 1.435 mm y carril UIC54

A2.2 Desvíos ancho 1.435 mm y carril UIC60

CARACTERÍSTICAS		TIPO C	TIPO V	TIPO AV
G E N E R A L E S	Tangente del ángulo de cruzamiento	0,071CR; 0,085CC; 0,071CC; 0,09CR y 0,11CC	0,042CR y 0,049CR	0,071CM y 0,026CM
	Ancho de vía en el cruzamiento	1.435 mm	1.435 mm	1.435 mm
	Velocidad máxima por vía directa	200 km/h	200 km/h	250 km/h
	Traviesas	Madera u hormigón según modelos	Madera	Hormigón
	Disposición de traviesas	Abanico	Abanico	Abanico
	Tipo de sujeción	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag
	Relación con vías adyacentes	Soldable	Soldable	Soldable
	Geometría de la vía desviada en desvío recto	Circular de 1 radio	Circular de 1 radio	Clotoide
	Inclinación de carriles	1:00	1:00	1:00
	Protección con aparato de dilatación	No	No	No
C A M B I O	Velocidad máxima por vía desviada	60, 60, 80, 50 y 50 km/h respectivamente	100 km/h	80 y 160 km/h respectivamente
	Tipo de agujas	Elásticas	Elásticas	Elásticas
	Trazado de aguja	Tangente	Tangente	Tangente
	Perfil de aguja	Bajo asimétrico	Bajo asimétrico	Bajo asimétrico
	Sujeción	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag	Elástica indirecta SKL-12 y Schwihaag
	Dispositivo de protección contra el descuadre	Muñón y horquilla	Muñón y horquilla	Muñón y horquilla
	Relación de aguja en su talón con vías adyacentes	Forjada y soldada	Forjada y soldada	Forjada y soldada

C O R A C R Ó U N Z C A O M N I T E R N A T C O A R R I L	Tipo	Bloque central de acero al manganeso	Bloque central de manganeso	acero al	Punta móvil
	Relación con vías adyacentes	Soldado	Soldado		Soldado
	Sujeción	Elástica indirecta SKL-12	Elástica indirecta SKL-12		Elástica indirecta SKL-12
	Perfil	UIC-33	UIC-33		Sin contracarril
	Relación con el corazón	Palastro al corazón aislado eléctricamente	Palastro al corazón eléctricamente	aislado	Sin contracarril
	Sujeción del contracarril	Con soporte único carril-contracarril	Con soporte único carril-contracarril		Sin contracarril
	Sujeción del carril	Exterior SKL-12, interior Schwihaag	Exterior SKL-12, interior Schwihaag		Sin contracarril

Tabla A2.2.- Descripción de los desvíos de ancho 1.435 mm y carril UIC60

A2.3 Desvíos ancho 1.668 mm y carril UIC54

	CARACTERÍSTICAS	TIPO A	TIPO B	TIPO C
	Tangente del ángulo de cruzamiento	0,09CR; 0,11CR; 0,085CC	0,11CR; 0,09CR; 0,075CR; 0,09CC y 0,11CC	0,11CR; 0,09CR; 0,075CR y 0,09CC
	Ancho de vía en el cruzamiento	1.668 mm Tg: 0,09CR y 0,11CR; 1.665 mm Tg: 0,085CC	1.668 mm	1.668 mm
G	Velocidad máxima por vía directa	140 km/h	160 km/h	200 km/h (0,11 - 160 km/h)
E	Traviesas	Madera	Madera	Madera
N	Disposición de traviesas	Perpendicular a la vía directa y a la bisectriz del cruzamiento	Semiabanico	Abanico
E				
R	Tipo de sujeción	Tg: 0,09CR y 0,11CR y 0,085CC Rígida-elástica Pandrol	Rígida combinada con elástica indirecta SLK-12	Elástica indirecta SKL-12 y Schwiag
A	Relación con vías adyacentes	Tg: 0,09CR y 0,11CR juntas embridadas Tg: 0,085CC incorporable a vía	Incorporable a la vía sin juntas (barra larga)	Soldable
L				
E	Geometría de la vía desviada en desvío recto	Circular de 2 radios en Tg:0,11 y 0,09; 1 radio en Tg:0,085	Circular de 2R Tg:0,11CR;0,09CR y 0,11CC; circular 1R Tg: 0,09CC y 0,075CR	Circular de 1 radio
S	Inclinación de carriles	1:20	1:20	1:20
	Protección con aparato de dilatación	Tg:0,11 y 0,09 sí; Tg:0,085 no.	No	No
	Velocidad máxima por vía desviada	20,30 y 60 km/h	45, 50, 60 y 60 km/h respectivamente	45, 50, 60 y 60 km/h respectivamente
	Tipo de agujas	Elásticas	Elásticas	Elásticas
C	Trazado de aguja	Secante Tg: 0,11 y 0,09; Tangente en Tg: 0,085	Secante Tg: 0,11 y 0,09CR; Tangente en Tg: 0,075 y 0,09CC	Tangente
A	Perfil de aguja	Carril normal con refuerzo	Normal con refuerzo o especial alto asimétrico	Bajo asimétrico
M	Sujeción	Tirafondos Tg: 0,09 y 0,11; tirafondo con arandela GROWER en Tg: 0,085	Tirafondos con arandelas Grower	Elástica indirecta SKL-12 y Schwiag
B	Dispositivo de protección contra el descuadre	Almohadillas	Almohadillas	Muñón y horquilla
I				
O	Relación de aguja en su talón con vías adyacentes	Juntas embridadas en Tg: 0,09 y 0,11; soldadas en Tg: 0,085	Soldada	Soldada a la aguja forjada

C O R A C Z R Ó U N Z C A O M N I T E R N A T C O A R R I L	Tipo	Monobloque de acero al manganeso	Monobloque o bloque central de acero al manganeso	Bloque central de acero al manganeso
	Relación con vías adyacentes	Embridado mediante colas de milano en Tg:0,09 y 0,11; junta a tope y tornillos alta resistencia en Tg:0,085	Subtipo B1 soldado, subtipo B2 encolado, subtipo B3 encolado corto	Soldado
	Sujeción	Rígida directa-tirafondos	Elástica indirecta SKL-12	Elástica indirecta SKL-12
	Perfil	UIC-33	UIC-33	UIC-33
	Relación con el corazón	Acodado		Palastro al corazón aislado eléctricamente
	Sujeción del contracarril	Con soportes a la traviesa	Con soporte único carril-contracarril	Con soporte único carril-contracarril
	Sujeción del carril	Tirafondos T: 0,09 y 0,11; Pandrol en Tg: 0,085	SKL-12	Exterior SKL-12, interior Schvihag

Tabla A2.3.- Descripción de los desvíos de ancho 1.668 mm y carril UIC54

A2.4 Desvíos ancho 1.668 mm y carril UIC60

	CARACTERÍSTICAS	TIPO C	TIPO V
	Tangente del ángulo de cruzamiento	0,09CR; 0,075CR; 0,09CC y 0,11CC	0,0314CR; 0,042CR y 0,052CC
	Ancho de vía en el cruzamiento	1.668 mm	1.668 mm
G	Velocidad máxima por vía directa	200 km/h	200 km/h
E	Traviesas	Madera	Madera (hormigón en el futuro)
N	Disposición de traviesas	Abanico	Abanico
E	Tipo de sujeción	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag
R	Relación con vías adyacentes	Soldable	Soldable
A	Geometría de la vía desviada en desvío recto	Circular	Circular (clotoide de vértice en prototipos)
L	Inclinación de carriles	1:00	1:00
E	Protección con aparato de dilatación	No	No
S	Velocidad máxima por vía desviada	=< 60 km/h	100 km/h (130km en prototipos)
C	Tipo de agujas	Elásticas	Elásticas
A	Trazado de aguja	Tangente	Tangente
M	Perfil de aguja	Bajo asimétrico	Bajo asimétrico
B	Sujeción	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag	Elástica indirecta SKL-12 y Schvihag
I	Dispositivo de protección contra el descuadre	Muñón y horquilla	Muñón y horquilla
O	Relación de aguja en su talón con vías adyacentes	Soldada	Soldada

C	Carriles con puntas de acero al manganeso y patas de liebre de igual acero	Carriles con puntas de acero al manganeso y patas de liebre de igual acero
O		
R	Relación con vías adyacentes	Soldado
A		
C	Sujeción	Elástica indirecta SKL-12
Z		
R		
U		
N		
C	Perfil	UIC-33
A	Relación con el corazón	Palastro
O		
M	Sujeción del contracarril	Con soporte único carril-contracarril
N		
I		
T		
E		
R		
N		
A		
T		
C		
O	Sujeción del carril	Exterior SKL-12, interior Schwichag
A		
R		
R		
I		
L		

Tabla A2.4.- Descripción de los desvíos de ancho 1.668 mm y carril UIC60

Anexo A3. Dimensiones características de los desvíos tipo B, C, V

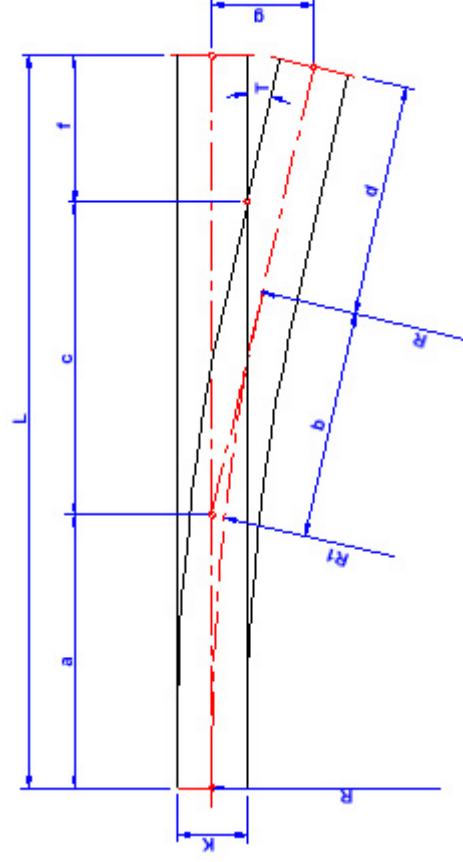


Figura A3.1.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B

A3.1 Desvío tipo B

Radio (m)	Tangente T	L	a	b	c	d	f	g	h	i	K	R	R1	Carril
190	1:7CC	25.302	11.292	13.247	14.010	763	4.123	1.981	750	2.362	1.435	190.000	--	UIC54
190	1:8CC	21.888	9.667	11.565	12.221	656	4.503	1.516	750	2.362	1.000	190.000	--	UIC54
190	1:10,5CR	22.322	6.945	8.698	15.377	6.679	4.853	1.458	750	2.362	1.000	190.000	--	UIC54
320/417	0,09CR	38.883	14.679	16.944	24.204	7.260	5.633	2.170	753	1.044,7	1.668	320.000	417.483	UIC54
320/230	0,011CR	34.965	14.597	13.194	20.368	7.174	5.159	2.227	753	1.044,7	1.668	320.000	230.453	UIC54
320	1:8,5CC	36.771	17.735	18.638	19.036	398	5.103	2.224	753	1.044,7	1.668	320.000	320.000	UIC54
320	0,09CR	34.994	13.383	13.211	21.610	8.399	5.633	1.937	753	1.044,7	1.435	319.883	319.883	UIC54
320/197	0,11CR	32.732	13.888	11.647	18.244	6.597	5.156	1.732	753	1.044,7	1.435	319.883	197.496	UIC54
320	1:9CC	34.640	16.713	17.607	17.927	320	5.325	1.980	753	1.044,7	1.435	320.000	320.000	UIC54
500	0,075CR	48.122	19.695	18.692	28.427	9.735	6.156	2.126	1.708	1.003	1.668	500.000	--	UIC54
500	0,09CC	47.686	23.144	22.142	24.542	2.400	5.876	2.173	1.708	1.003	1.668	500.000	--	UIC54
500/440	0,075CR	44.345	19.028	16.917	25.317	8.400	6.156	1.893	1.708	1.003	1.435	499.883	440.109	UIC54
500/405	0,09CC	44.522	21.669	20.003	24.853	1.850	5.876	1.964	1.708	1.003	1.435	499.883	404.939	UIC54

Tabla A3.1.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B, según Figura A3.1 (mm)

Radio (m)	Tangente T	L	a	b	c	d	f	g	h	K	R	Carril
250	0,11CR	34.409	13.663	13.663	15.209	6.145	4.603	2.166	934	1.668	250.000	UIC54
250	0,125CC	32.479	15.513	15.513	11.229	519	4.803	1.989	934	1.435	249.883	UIC54
250	0,09CR	33.170	11.190	11.190	15.978	9.857	5.070	1.887	934	1.435	249.883	UIC54
318	0,09CR	38.320	14.260	14.260	18.571	9.381	5.070	2.119	419	1.668	318.370	UIC54 UIC60
318	0,11CC	37.643	17.412	17.412	15.135	2.400	4.677	2.166	419	1.668	318.370	UIC60
318	0,09CR	35.726	14.260	14.260	15.977	6.787	5.070	1.887	419	1.435	318.253	UIC54 UIC60
318	0,11CC	35.800	17.412	17.412	12.776	557	5.193	1.965	419	1.435	318.253	UIC54 UIC60

Tabla A3.2.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B, según Figura A3.2 (mm)

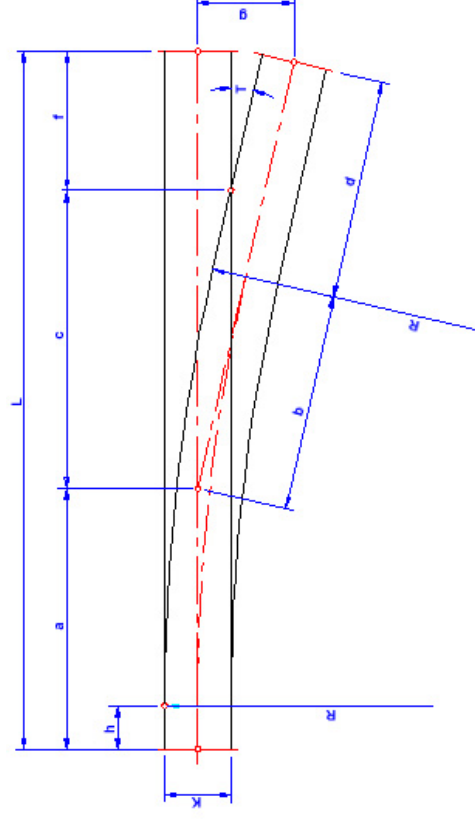


Figura A3.2.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B, C y V

A3.2 Desvío tipo C

Radio (m)	Tangente T	L	a	b	c	d	f	g	h	K	R	Carril
250	0,11CR	34.409	13.663	13.663	15.209	6.145	4.603	2.166	934	1.668	250.000	UIC54
250	0,125CC	32.479	15.513	15.513	11.229	519	4.803	1.989	934	1.435	249.883	UIC54
250	0,09CR	33.170	11.190	11.190	15.978	9.857	5.070	1.887	934	1.435	249.883	UIC54
318	0,09CR	38.320	14.260	14.260	18.571	9.381	5.070	2.119	419	1.668	318.370	UIC54 UIC60
318	0,11CC	37.643	17.412	17.412	15.135	2.400	4.677	2.166	419	1.668	318.370	UIC60
318	0,09CR	35.726	14.260	14.260	15.977	6.787	5.070	1.887	419	1.435	318.253	UIC54 UIC60
318	0,11CC	35.800	17.412	17.412	12.776	557	5.193	1.965	419	1.435	318.253	UIC54 UIC60
500	0,075CR	46.550	18.693	18.693	22.271	9.165	5.587	2.084	--	1.668	500.000	UIC54 UIC60
500	0,09CC	44.834	22.417	22.417	18.390	0	4.027	2.009	--	1.668	500.000	UIC54 UIC60
500	0,085CC	42.353	21.176	21.176	15.977	0	4.503	0	--	1.435	499.883	UIC60

Tabla A3.3.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C, según Figura A3.2 (mm)

A3.3 Desvío tipo V

Radio (m)	Tangente T	L	a	b	c	d	f	g	K	R	R1	Carril
1.500	0,042CR	79.130	31.469	31.469	47.661	16.193	7.930	2.000	1.668	1.500.000	--	UIC60
1.500	0,052CC	77.904	38.952	38.952	38.952	0	7.185	2.024	1.668	1.500.000	--	UIC60
3.000/2.010/3.000	0,0314	101.509	37.783	37.783	53.134	25.942	10.592	2.000	1.668	3.000.000	2.010.000	UIC60

Tabla A3.4.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V, según Figura A3.2 (mm)

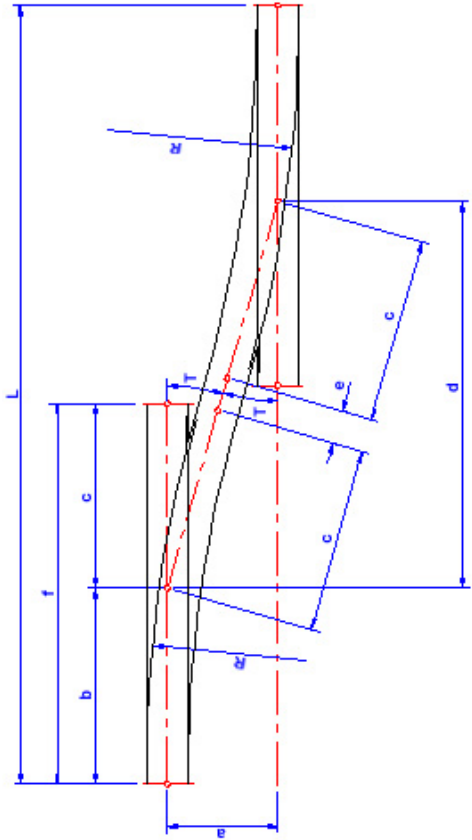


Figura A3.3.- Variables geométricas básicas del desvío tipo B, C y V (anchos de vía 1.435 y 1.668 mm), y AV (ancho de vía 1.435 mm)

A3.4 Tipo B, ancho de vía 1.435 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
320	0,09CR	3.808	13.385	21.609	42.311	-737	34.994	69.080	UIC54
		3.920	13.385	21.609	43.556	507	34.994	70.324	
		4.000	13.385	21.609	44.444	1.399	34.994	71.213	
500/405	0,09CC	3.920	21.669	21.853	43.556	20	43.552	86.894	UIC54
		4.000	21.669	21.853	44.444	912	43.552	87.782	
500/440	0,075CR	3.808	19.029	25.316	50.773	278	44.345	88.831	UIC54
		3.920	19.029	25.316	52.267	1.775	44.345	90.324	
		4.000	19.029	25.316	53.333	2.845	44.345	91.391	

Tabla A3.5.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.5 Tipo B, ancho de vía 1.668 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
320/417	0,09CR	3.808	14.679	24.204	42.311	-5.926	38.883	71.669	UIC54
		3.920	14.679	24.204	43.556	-4.676	38.883	72.914	
		4.000	14.679	24.204	44.444	-3.784	38.883	73.803	
320/230	0,11CR	3.808	14.597	20.368	34.618	-5.909	34.965	63.812	UIC54
		3.920	14.597	20.368	35.636	-4.885	34.965	64.830	
		4.000	14.597	20.368	36.364	-4.153	34.965	65.558	
500	0,075CR	3.808	19.695	28.427	50.773	-5.938	48.122	90.163	UIC54
		3.920	19.695	28.427	52.267	-4.441	48.122	91.657	
		4.000	19.695	28.427	53.333	-3.371	48.122	92.723	

Tabla A3.6.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo B y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.6 Tipo C, ancho de vía 1.435 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
318	0,09CR	3.808	14.679	21.047	42.311	383	35.726	71.670	UIC54
		3.920	14.679	21.047	43.556	1.632	35.726	72.915	UIC60
		4.000	14.679	21.047	44.444	2.524	35.726	73.803	
500	0,071CR	3.808	17.834	27.109	53.312	-769	44.943	88.981	UIC54
		3.920	17.834	27.109	54.880	797	44.943	90.549	UIC60
		4.000	17.834	27.109	56.000	1.920	44.943	91.669	
		4.300	17.834	27.109	60.200	6.131	44.943	95.869	
760	0,071CC	4.000	27.109	27.109	56.000	1.919	54.218	110.218	UIC60
		4.300	27.109	27.109	60.200	6.129	54.218	114.418	

Tabla A3.7. - Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.7 Tipo C, ancho de vía 1.668 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
250	0,11CR	3.808	14.597	19.812	34.618	-4.800	34.409	63.812	UIC54 UIC60
		3.920	14.597	19.812	35.636	-3.776	34.409	64.830	
		4.000	14.597	19.812	36.364	-3.044	34.409	65.558	
318	0,11CC	3.808	17.831	19.812	34.618	-4.797	37.643	70.281	UIC60
		3.920	17.831	19.812	35.636	-3.773	37.643	71.299	
		4.000	17.831	19.812	36.364	-3.041	37.643	72.026	
	0,09CR	3.808	14.679	23.641	42.311	-4.800	38.320	71.670	UIC54 UIC60
		3.920	14.679	23.641	43.556	-3.550	38.320	72.915	
		4.000	14.679	23.641	44.444	-2.658	38.320	73.803	
500	0,075CR	3.808	18.692	27.858	50.773	-4.800	46.550	88.158	UIC54 UIC60
		3.920	18.692	27.858	52.267	-3.303	46.550	89.652	
		4.000	18.692	27.858	53.333	-2.233	46.550	90.718	
	0,09CC	4.300	22.417	22.417	47.778	3.131	44.834	92.612	UIC54 UIC60

Tabla A3.8. - Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo C y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.8 Tipo V, ancho de vía 1.435 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
1.500	0,042CR	4.000	31.486	42.111	95.238	11.093	73.597	158.210	UIC60
		4.300	31.486	42.111	102.381	18.243	73.597	165.353	

Tabla A3.9.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.9 Tipo V, ancho de vía 1.668 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
3.000/2.010/3.000	0,0314CR	4.000	37.783	63.726	127.389	0	101.509	202.955	UIC60
		4.300	37.783	63.726	136.943	9.553	101.509	212.509	
1.500	0,042CR	4.000	31.469	47.661	95.238	0	79.130	158.175	UIC60
		4.300	31.469	47.661	102.381	7.142	79.130	165.318	
	0,052CR	4.300	38.952	38.952	82.649	4.894	77.904	160.596	UIC60

Tabla A3.10.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo V y ancho de vía de 1.668 mm, según Figura A3.3 (mm)

A3.10 Tipo AV, ancho de vía 1.435 mm

Radio (m)	Tangente T	a	b	c	d	e	f	L	Carril
760	0,071CM	4.300	27.109	27.109	60.200	6.129	54.218	114.418	UIC60
10.000/4.000	0,026CM	4.300	65.113	66.815	161.030	27.457	131.928	291.254	UIC60

Tabla A3.11.- Valores de las variables geométricas básicas del desvío tipo AV y ancho de vía de 1.435 mm, según Figura A3.3 (mm)

4 RCM²

En la actualidad, el gran avance experimentado tanto en las nuevas tecnologías como en los sistemas de información, además de los nuevos requerimientos de disponibilidad de las nuevas maquinarias, han fomentado el surgimiento de nuevas técnicas de mantenimiento y perfeccionado las ya existentes. A continuación se presenta la técnica de mantenimiento RCM², constituida por las técnicas conocidas como Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability-Centred Maintenance, RCM₁) y Monitorización Remota Basada en la Condición (Remote Condition Monitoring, RCM₂). Ambas técnicas, RCM₁ y RCM₂, se describen por separado, analizando sus propiedades más relevantes, así como el estado del arte. El capítulo concluye analizando RCM² aplicado en el sector ferroviario.

RCM² ha sido la técnica empleada en el trabajo de investigación que se presenta en la presente tesis, llevando a cabo su diseño, desarrollo e implementación en los desvíos ferroviarios, como se describe en el siguiente capítulo.

Para ello, se introducen los términos y conceptos elementales en el ámbito de mantenimiento, como son el propio de mantenimiento, mantenibilidad, disponibilidad, fiabilidad, etc., imprescindibles para poder comparar las distintas técnicas que se mencionan a continuación.

Índice de contenidos

4	RCM²	119
4.1	Introducción: Conceptos básicos	122
4.1.1	Mantenimiento	122
4.1.1.1	Principales costes asociados al mantenimiento	123
4.1.1.2	Política de mantenimiento basada en el fallo	125
4.1.1.3	Política de mantenimiento basada en la duración de vida del sistema	127
4.1.1.4	Política de mantenimiento basada en la inspección	129
4.1.1.5	Política de mantenimiento basada en el examen de la condición	131
4.1.1.6	Política de mantenimiento basada en la oportunidad	133
4.1.2	Mantenibilidad	135
4.1.3	Fiabilidad	136
4.1.4	Disponibilidad	139
4.2	Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad	140
4.2.1	Estado del arte	140
4.2.2	Situación actual del RCM ₁ en el contexto del mantenimiento	142
4.2.3	Principales etapas en el desarrollo e implementación de RCM ₁	143
4.2.4	Proceso de aplicación del RCM ₁	144
4.3	Monitorización remota basada en la condición	146
4.3.1	Efectos dinámicos	148
4.3.2	Efectos partículas	153
4.3.3	Efectos térmicos	153
4.3.4	Efectos eléctricos	154
4.3.5	Efectos químicos y/o físicos	154
4.4	RCM² aplicado a los sistemas ferroviarios	154
	Referencias	159
	Anexo I. Vector de camino mínimo y de corte	164
	Anexo II. Terminología	165

Índice de figuras

Figura 4.1.- Disposiciones en serie y paralelo de los componentes de un sistema.....	137
Figura 4.2.- Evolución de los campos de interés del mantenimiento	142
Figura 4.3.- Ejemplo de un grupo de revisión de RCM ₁	145
Figura 4.4.- Esquema básico de RCM ₂	147
Figura 4.5.- RCM ² : Composición y ventajas.....	158

4.1 Introducción: Conceptos básicos

4.1.1 Mantenimiento

Se entiende por proceso de mantenimiento a la actividad por la que se mantiene la capacidad del sistema para realizar una función. También se define mantenimiento como el conjunto de acciones dirigidas para intentar garantizar la funcionalidad del equipo o instalación, entendiendo como funcionalidad a la proporción de tiempo durante el cual el sistema en consideración estará disponible para el cumplimiento de sus funciones básicas [37]. Esto dependerá de las características inherentes del sistema, como su fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad, así como de la logística y el mantenimiento, cuyos objetivos son gestionar el suministro de los recursos necesarios para la conclusión con éxito de todas las actividades operativas y de mantenimiento, así como velar por la ejecución de las tareas [33].

Una actividad de mantenimiento es el conjunto de operaciones que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad del elemento o sistema. Los objetivos básicos de la actividad de mantenimiento son la reducción del cambio de la condición, garantizar la fiabilidad y seguridad exigidas, así como la recuperación de la funcionalidad del sistema (cuando ésta se ha perdido), empleando para ello un consumo mínimo de recursos [34].

El fallo del sistema podría definirse como un suceso cuya realización provoca, la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos específicos del sistema [37].

Las políticas actividades de mantenimiento son:

1. **Correctivo.** Las tareas de mantenimiento correctivo, CRT^1 , son las tareas que se realizan con el propósito de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren. La duración de dicha tarea se representará en las secciones siguientes mediante el término DMT^c . DMT^c representa el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de la tarea de mantenimiento correctivo [41].
2. **Preventivo.** La actividad de mantenimiento preventivo, PRT , es una tarea que se realiza para reducir la probabilidad de fallo del elemento o sistema, o bien para maximizar el beneficio operativo. El tiempo de realización de la actividad se representa por DMT^p , el cual indica, al igual que DMT^c para tareas de mantenimiento correctivo, el tiempo transcurrido necesario para la conclusión de la tarea de mantenimiento preventivo [23].

¹ En el Anexo II del presente capítulo se presenta un listado de los términos y acrónimos empleados.

3. **Predictivo.** Este tipo de tareas de mantenimiento, llamada por muchos autores como tareas de mantenimiento condicional (COT^2), se basa en el cambio de la condición y/o prestaciones del elemento o sistema para llevar a cabo las tareas de mantenimiento. Las ejecuciones de las tareas de mantenimiento preventivo deben estar basadas en el estado real del elemento o sistema mediante, por ejemplo, la vigilancia de ciertos parámetros, con el fin de poder identificar el momento más conveniente en que se deben de realizar las tareas de mantenimiento preventivo. El propósito de esta vigilancia es poder evaluar la condición mediante el empleo de determinadas técnicas [1].

Los tipos de parámetros más importantes que permiten evaluar la condición del elemento o sistema son el indicador adecuado de la condición (RCI) y el estimador adecuado de la condición (RCP). RCI es un parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema en el instante de la comprobación. RCP es un parámetro observable que describe la condición del elemento en cada instante de tiempo operativo.

Existen dos tipos de actividades de mantenimiento condicional en función del empleo de la información obtenida acerca de la condición del elemento o sistema, la de inspección y examen. La inspección es una tarea específica de mantenimiento condicional, cuyo resultado es un informe sobre la condición del elemento determinada por RCI . La frecuencia de las inspecciones se representa por TI . Mediante el examen se obtiene una descripción numérica de la condición del elemento en ese instante mediante RCP . El tiempo del examen viene dado por TE . El valor crítico de RCP se representa por RCP^{cr} , que determinará el TE óptimo para el primer examen, TE^1 .

Algunas de las políticas que derivan de las anteriormente expuestas son:

- El fallo.
- La duración de vida del sistema.
- La inspección.
- El examen de la condición.
- La oportunidad.

A continuación se describirán brevemente cada una de las políticas mencionadas, en las que se hará un análisis de los costes que en cada una se dan.

4.1.1.1 Principales costes asociados al mantenimiento

El coste directo de cada tarea de mantenimiento, CMT , viene dado por la ecuación (4.1).

$$CMT = f(C_s, C_m, C_p, C_{te}, C_f, C_d) \quad (4.1)$$

² En el Anexo II aparece un listado de todos acrónimos utilizados en este capítulo.

siendo C_s el coste de los repuestos, C_m el coste del material, C_p el coste del personal, C_{te} el coste de las herramientas y el equipo, C_f el coste de las instalaciones y C_d el coste relacionado con los datos técnicos.

C_p será función del tiempo empleado en la tarea de mantenimiento, DMT , y del valor monetario de la remuneración del trabajador en realizar dicha tarea, HCP , según la ecuación (4.2).

$$C_p = f(DMT, HCP) \quad (4.2)$$

En las secciones siguientes se empleará el superíndice o subíndice c cuando se haga referencia a tiempos o costes relacionados con el mantenimiento correctivo, p cuando se refiere a tareas de mantenimiento preventivo y m para predictivo o condicional.

Se entiende por DMT la duración de la tarea de mantenimiento. DMT_p representa el tiempo empleado en la tarea del mantenimiento para un porcentaje de tareas dadas, el cual viene dado por la ecuación (4.3),

$$DMT_p = t \rightarrow M(t) = P(DMT \leq t) = \int_0^t m(t)dt = P, \quad (4.3)$$

donde t es el índice de tiempo, $M(t)$ es la función de mantenibilidad y $m(t)$ la función de densidad de probabilidad de DMT .

La duración media de la tarea de mantenimiento, $MDMT$, es la duración esperada del tiempo de mantenimiento, $E(DMT)$, y viene dado por la ecuación (4.4).

$$E(DMT) = MDMT = \int_0^{\infty} [1 - M(t)]dt = \int_0^{\infty} m(t)tdt. \quad (4.4)$$

La duración media de los periodos de servicio de un elemento entre dos fallos, tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures, $MTBF$) viene dada por la ecuación (4.5),

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TBF}{n}, \quad (4.5)$$

donde TBF , Time Between Failures, es el tiempo entre fallos, y n el número total de fallos considerados. En ocasiones se emplea la proporción de fallo, λ , en lugar de $MTBF$, siendo λ la inversa de $MTBF$.

El tiempo medio de reparación, denominado $MTTR$ (Mean Time to Repair), se calcula según la ecuación (4.6).

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n TTR}{n}, \quad (4.6)$$

siendo TTR , Time to Repair, el tiempo empleado en la tarea de mantenimiento necesario para que el elemento o sistema recupere la funcionalidad.

4.1.1.2 Política de mantenimiento basada en el fallo

Las actividades de mantenimiento en este tipo de política consisten básicamente en llevar a cabo un mantenimiento correctivo una vez ocurrido el fallo en el elemento o sistema [63]. Por tanto, si se ha de llevar a cabo este tipo de mantenimiento, se debería hacer en los elementos o sistemas en los que la pérdida de su funcionalidad no repercute en la seguridad del usuario o en el entorno.

Mediante el empleo de esta técnica se garantiza la utilización de la vida operativa del elemento considerado. Así pues, el tiempo medio para el mantenimiento, $MTTM$, coincide con $MTTF$. De este modo, el valor de CU será 1, según se deduce de la ecuación (4.7).

$$CU = \frac{MTTM}{MTTF}, \quad (4.7)$$

siendo

$$MTTM = MTTF = \int_0^{\infty} R(T) dt, \quad (4.8)$$

donde $R(t)$ es la función de fiabilidad, definida según la ecuación (4.9).

$$R(t) = P(TTF > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt, \quad (4.9)$$

y $f(t)$ representa la función de densidad de la variable aleatoria conocida como tiempo hasta el fallo (Time to Failure, TTF).

La principal ventaja de esta política de mantenimiento es que se recupera la inversión monetaria en el elemento o sistema. Entre las desventajas más destacadas están, por un lado, las ocasionadas por los daños que se pueden producir en otros elementos o sistemas por el fallo dado, siendo los costes de reparación, tanto directos como indirectos, en torno a cuatro veces superior una vez se ha dado dicho fallo. Por otro lado, los tiempos de inmovilización debido a la indisponibilidad de los recursos suele ser mayor en este tipo de mantenimiento que en otros, como el preventivo o predictivo [45].

El coste total de mantenimiento, CMF , viene dado por la ecuación (4.10),

$$CMF(T_{st}) = f(CMT^c, NMT^c, T_{st}, CLR) \quad (4.10)$$

siendo T_{st} el tiempo de operación previsto, CMT^c el coste directo de cada tarea de mantenimiento correctivo llevado a cabo, NMT^c el número de tareas de mantenimiento correctivo durante el tiempo T_{st} , y CLR el coste de pérdida potencial de ingresos o coste de oportunidad.

Debido al carácter aleatorio de las variables $CMF(T_{st})$, CMT^c , NMT^c y CLR dadas en la ecuación (4.10), se emplea la esperanza matemática de dichos valores, siendo éstas respectivamente $MCMF(T_{st})$, $MCMT^c$, $MNMT^c$ y $MCLR$, obteniendo con ello la relación dada en la ecuación (4.11).

$$MCFM(T_{st}) = f(MCMT^c, MNMT^c, T_{st}, MCLR^c) \quad (4.11)$$

El valor de $NMT(T_{st})$ se expresará según la ecuación (4.12),

$$MNMT(T_{st}) = MNF(T_{st}) = \sum_{i=1}^{i=\infty} F^i(T_{st}), \quad (4.12)$$

en la que $F^i(T_{st})$ es la función acumulativa del tiempo hasta el fallo i , siendo $MNMT(T_{st})$:

$$MNMT(T_{st}) = \frac{T_{st}}{MTTF}, \quad (4.13)$$

en los casos en que $T_{st} \gg MTTF$.

CLR puede expresarse según la ecuación (4.14),

$$CLR = f(DMT^c, DST^c, HR) \quad (4.14)$$

donde DMT^c es la duración de la tarea del mantenimiento, DST^c es la duración de la tarea de apoyo y HR representa el valor monetario de las pérdidas producidas por unidad de tiempo en la que el elemento o sistema no está disponible para generar los ingresos esperados como consecuencia del fallo. La ecuación (4.14) suele expresarse empleando los valores medios, como ya se hizo con la ecuación (4.9), de las distintas variables que la componen, según la ecuación (4.15).

$$MCLR = (MDMT^c + MDST^c)HR. \quad (4.15)$$

Mediante las ecuaciones (4.12), (4.13) y (4.15) se obtiene el coste total directo esperado para una política de mantenimiento basado en el fallo, como se indica en la ecuación (4.16).

$$MCFM^f(T_{st}) = (MCMT^c + MCLR)MNMT^c(T_{st}) \quad (4.16)$$

4.1.1.3 Política de mantenimiento basada en la duración de vida del sistema

La política de mantenimiento basada en la duración de vida del sistema, usualmente conocido como mantenimiento preventivo o planificado, consiste en llevar a cabo tareas de mantenimiento preventivo a intervalos fijos, en función de la distribución de la vida de éstos. El fin es prevenir el fallo y sus consecuencias. Este tipo de políticas de mantenimiento se lleva a cabo en elementos en los que dicha política reduzca la probabilidad de fallo en el futuro, y que el coste total de aplicar esta política sea sustancialmente menor que el de la política de mantenimiento basado en el fallo. También se emplea esta política cuando la observación de la condición del elemento no es técnicamente factible (o es econonómicamente inaceptable) [1] y [2].

El hecho de poder planificar las tareas de mantenimiento en este tipo de políticas, hace posible que se puedan suministrar todos los recursos de apoyo al mantenimiento, tanto humanos como materiales, así como evitar posibles interrupciones costosas. Con esta política se trata de evitar la producción de determinados fallos que podrían ocasionar unos costes significativos, así como determinados daños técnicos no deseados derivados del fallo.

Una de las desventajas más significativas que presenta este tipo de políticas es que no se puede aprovechar el ciclo de vida de la mayoría de los elementos, ya que éstos se reemplazan antes de que fallen, independientemente de su estado. Así pues, el coeficiente de utilización del elemento o sistema considerado, CU^l , dado por la ecuación (4.17), es muy inferior al que se da para una política de mantenimiento basada en el fallo, según se indica en la ecuación (4.7).

$$CU^l = \frac{MTTM^p}{MTTF} \ll 1, \quad (4.17)$$

donde $MTTM^p$ es el tiempo medio para el mantenimiento basado en la duración media del sistema, definido según la ecuación (4.18).

$$MTTM^p = \int_0^{TP} D(t)dt \ll MTTF, \quad (4.18)$$

siendo TP el tiempo para efectuar el mantenimiento, y $D(t)$ la función de durabilidad, basada ésta en la distribución de probabilidad de la duración de la vida del elemento o sistema hasta el fallo.

Análisis de los costes

Los costes directos relacionados con cada tarea de mantenimiento basado en la vida del sistema, CMT^p , vienen dados por la ecuación (4.19),

$$CMT^p = C_{sp}^p + C_m^p + C_p^p + (DMT^p + DST^p)HR, \quad (4.19)$$

en el que el superíndice p representa el coste correspondiente en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema.

El coste directo total asociado a cada tarea de mantenimiento, considerando la adopción de diferentes tareas de mantenimiento, se define según la ecuación (4.14).

$$CMT^l = CMR^l + (MDMT^l + MDST^l)HR. \quad (4.20)$$

El coste total de las tareas correctivas en el intervalo de tiempo TP es el producto del número medio de fallos entre dos sustituciones preventivas, expresado mediante $MNF(TP)$, y el coste de cada tarea correctiva. Así pues, el coste medio de la tarea de mantenimiento preventivo por unidad de operación para un tiempo TP específico, expresado como $UMC^l(TP)$, viene dado por la ecuación (4.21).

$$UMC^l(TP) = \left[\frac{F(TP) \cdot CMT^c + CMT^p}{TP} \right]_{\min}, \quad (4.21)$$

donde $F(TP)$ es la función de distribución del tiempo hasta el fallo, dada por la ecuación (4.22).

$$F(TP) = P(TTF \leq TP). \quad (4.22)$$

4.1.1.4 Política de mantenimiento basada en la inspección

Con el fin de poder tener una mejor utilización del elemento objeto del mantenimiento que el que tendría empleando las técnicas de mantenimiento preventivo o correctivo, y manteniendo los niveles de seguridad y/o utilidad requeridos, se emplea la política de mantenimiento basado en la condición. Ésta política se basa en realizar el mantenimiento en base al cambio en la condición y/o las prestaciones del estado real del elemento o sistema. La inspección es una tarea de mantenimiento condicional, que tiene como resultado un informe sobre la condición del elemento o sistema, determinando si ésta es satisfactoria o no [62].

Durante la operación del elemento o sistema, las inspecciones se llevan a cabo con intervalos fijos especificados hasta que se alcanza el nivel crítico, según se muestra en la ecuación (4.23).

$$RCI(TI^i) > RCI_{cr}, \quad (4.23)$$

siendo RCI la función que determina la condición del elemento o sistema y TI^i la frecuencia más adecuada para las inspecciones. En el caso de que el elemento fallara entre inspecciones, se deberá realizar un mantenimiento correctivo.

El coeficiente de utilización de la vida del elemento o sistema, cuya sustitución no se basa en la condición que presenta, viene dado por la ecuación (4.24),

$$CU^i = \frac{MTIR}{MTTF} = \frac{\int_0^{\infty} R_{RCI_{cr}} dt}{MTTF}, \quad (4.24)$$

donde $MTIR$ representa el tiempo medio hasta la sustitución del elemento. Dicho valor es inferior al obtenido por la ecuación (4.7) para el mantenimiento basado en el fallo, y superior al valor obtenido por la ecuación (4.17) para el mantenimiento basado en la duración de vida del sistema.

Con el fin de determinar el procedimiento óptimo de mantenimiento basado en la inspección, se pueden utilizar distintos criterios, como son la distribución de probabilidad de las características que describen el elemento, RCI , o bien el coste como resultado de considerar los costes de realización de la inspección, el coste de fallo, el coste del equipo usado, etc.

Así pues, cuando el criterio de optimización elegido es la distribución de probabilidad, RCI , el fin principal es mantener una fiabilidad del elemento o sistema alta, Rr . Es decir, una probabilidad de fallo muy baja, favoreciendo con ello determinados criterios de seguridad. Así pues, las actividades de mantenimiento requeridas se realizarán en un momento determinado, independientemente de la condición de la máquina. El tiempo para realizar estas actividades, TP , se determina en base a la función de durabilidad, $D(t)$, basada en la distribución de probabilidad de la duración de la vida de funcionamiento del elemento o sistema hasta el fallo, debiendo de satisfacer las ecuaciones (4.25) y (4.26).

$$D(TP) = P(TTF > TP) > Rr, \quad (4.25)$$

$$P[RCI(TI^{i+1}) \leq RCI^{cr} | RCI(TI^i) \leq RCP^{cr}] = Rr + \frac{R(TI^{i+1})}{R(TI^i)}. \quad (4.26)$$

Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones (4.25) y (4.26), se obtiene la ecuación (4.27),

$$R(TI^{i+1}) = R(TI^i)Rr, \quad (4.27)$$

en la que se puede obtener el valor de TI^{i+1} .

Cuando, por el contrario, el criterio que se emplea es la minimización de los costes totales por unidad de tiempo asociados con la inspección, se ha de determinar la frecuencia óptima de inspección. El modelo para poder tratar este caso, ver referencia [29], viene dado por la ecuación (4.28),

$$C(TI_1, TI_2, \dots, TI_n) = \frac{CMT^c + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{TI_k}^{TI_{k+1}} [CMT^i(k+1) + CLR(TI_{k+1} - t)] f(t) dt}{MTTF + Tr + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{TI_k}^{TI_{k+1}} (TI_{k+1} - t) f(t) dt}, \quad (4.28)$$

en la que $f(t)$ es la función de densidad del tiempo hasta el fallo del sistema, CMT^i el coste correspondiente a la inspección i , CLR el coste por unidad de tiempo asociado con el funcionamiento del sistema con un fallo no detectado, CMT^c el coste de realizar una tarea correctiva c , DMT^c la duración de la tarea correctiva c , TI_j el intervalo en realizar la inspección j , y $C(TI_1, TI_2, \dots, TI_n)$ el coste total esperado por unidad de tiempo de la inspección y recuperación del sistema o elemento.

4.1.1.5 Política de mantenimiento basada en el examen de la condición

La política de mantenimiento basado en el examen de la condición se basa en la programación de las tareas de mantenimiento en función de las características de fiabilidad de determinados elementos. La determinación de estos elementos se realiza normalmente en base al interés de que éstos realicen su función con una probabilidad de fallo muy baja, ya que de ellos puede depender la seguridad del proceso, la relación coste-eficiencia o que no se den determinadas interrupciones [38], [49] y [56]. Las tareas de mantenimiento se llevan a cabo en el momento TP . Así pues, la programación de las tareas se realizará sobre la base de la ecuación (4.29),

$$R(TP) = P(TTF > TP) = R_r, \quad (4.29)$$

siendo TTF una variable aleatoria que representa el tiempo hasta el fallo, R_r el nivel de fiabilidad exigido y $R(TP)$ el valor de la función de la fiabilidad hasta el instante TP .

El empleo de este tipo de política de mantenimiento implica que no se aproveche todo el ciclo de vida del elemento o sistema, ya que se sustituye antes de que este falle, así como un alto coste necesario para poder garantizar el nivel de fiabilidad requerido.

Unas de las herramientas empleadas para poder determinar la fiabilidad es el empleo de un estimador adecuado de la condición, en adelante RCP. Dicho estimador suministra información adicional sobre el cambio de la condición de los elementos considerados a lo largo de su vida operativa [31]. RCP es un parámetro que está directamente o indirectamente relacionado con el elemento y sus prestaciones, y que describe la condición del elemento durante su vida operativa, dando una descripción completa de la condición del elemento, un cambio continuo y monótono durante el tiempo operativo, y una definición numérica de la condición del elemento.

Según este método, un elemento está en estado de funcionamiento en tanto que su estimador de condición se encuentre dentro del intervalo definido por su valor inicial, RCP_{in} , y su valor límite, RCP_{lim} . De este modo, cuando el estimador sobrepasa el límite prescrito, se presenta la transición al estado de fallo. En todo momento del tiempo operativo del estimador, $RCP(t)$, es una variable aleatoria que se ha de representar mediante su distribución de

probabilidad. La función de densidad del estimador de condición en un instante de tiempo t viene dada mediante $f_{RCP(t)}(c)$. Así pues, la fiabilidad, o lo que es lo mismo, la probabilidad de que el estimador de condición se encuentre dentro del intervalo admitido en el instante t , viene dada por la ecuación (4.30).

$$P(RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{lim}) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP(t)}(c) dc = R(t). \quad (4.30)$$

En función del valor de RCP en cualquier instante de tiempo de operación podemos tener los siguientes tres casos:

- $RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{cr}$. En este caso, se deberá continuar con las inspecciones o exámenes.
- $RCP_{cr} < RCP(t) < RCP_{lim}$. Se precisa la tarea de mantenimiento preventivo.
- $RCP_{lim} < RCP(t)$. El fallo ha ocurrido, por lo que es necesario la tarea de mantenimiento correctivo.

Entre las ventajas principales del método de mantenimiento basado en RCP están las siguientes:

- Proporciona el nivel de fiabilidad exigido para cada elemento individual.
- Reduce el coste del mantenimiento como resultado de permitir una vida operativa más larga para cada elemento individual, comparado con el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema, así como favorece una mayor disponibilidad del elemento como consecuencia de una reducción del número de inspecciones comparado con un mantenimiento basado en la inspección.
- Permite una planificación de las tareas propias del mantenimiento
- Este método puede aplicarse a cualquier elemento o sistema.

Según lo comentado anteriormente, todos los sistemas realizan la función esperada hasta el tiempo TE_1 . La vida operativa media alcanzable, $MUL(TE_1)$, está expresada según la ecuación (4.31).

$$MUL(TE_1) = \int_0^{TE_1} R_{lim}(t) dt = \int_0^{TE_1} \left[\int_{RCP_{in}}^{RCP_{cr}} f_{RCP(t)}(c) dc \right] dt. \quad (4.31)$$

De este modo, se realizarán las tareas de mantenimiento en algunos de los sistemas o elementos, pero otros de ellos continuarán su funcionamiento, proporcionando así la fiabilidad exigida hasta que cada uno de ellos alcance el valor crítico RCP_{cr} . La vida operativa prolongada esperada, $E(EOL)$, viene dada por la ecuación (4.32).

$$E(EOL) = \int_{TE_1}^{\infty} R_{rc}(t) dt = \int_{TE_1}^{\infty} \left[\int_{RCP_{in}}^{RCP_{cr}} f_{RCP(t)} dc \right] dt, \quad (4.32)$$

donde $R_{rc}(t)$ es la probabilidad de que la función aleatoria $RCP(t)$ tenga, en el instante de tiempo t , un valor menor o igual que el valor crítico RCP_{cr} . El coeficiente de utilización, CU^e , se obtiene a partir de la ecuación (4.33).

$$CU^e = \frac{MULEB}{MTTF} = \frac{\int_0^{TE_1} R_{lim}(t) dt + \int_{TE_1}^{\infty} R_{rc}(t) dt}{\int_0^{\infty} R_{lim}(t) dt}, \quad (4.33)$$

siendo $CU^e > CU^l$ (ver ecuación (4.24)).

4.1.1.6 Política de mantenimiento basada en la oportunidad

La política de mantenimiento basada en la oportunidad se fundamenta en la realización de tareas de mantenimiento adicionales como consecuencia de una parada obligatoria, como es el caso en el que algún elemento fallara. En este caso, aunque el mantenimiento correctivo se realizara sobre el elemento o sistema que hubiera fallado, se aprovecharía esa parada para efectuar, por ejemplo, un mantenimiento preventivo en otros elementos.

La ecuación (34) muestra el coste medio total de una política de mantenimiento basada en el fallo para todos los elementos críticos el sistema o subsistema, NCI , siendo $MCFMI(T_{st})$ el tiempo operativo establecido en el caso de sustitución individual, y $MCFM(T_{st})$ el coste total medio de una política basada en el fallo i , siendo $i = 1, 2, \dots, NCI$.

$$MCFMI(T_{st}) = \sum_{i=1}^{NCI} MCFM_i(T_{st}) = \sum_{i=1}^{NCI} MNMT_i^c(T_{st}) (C_{sp_i} + C_{m_i} + C_{l_i} + C_{o_i}), \quad (4.34)$$

La sustitución del grupo, incluyendo elementos heterogéneos críticos, es una metodología empleada para reducir el coste de mantenimiento total [32]. Este tipo de sustitución se le conoce con el nombre de sustitución de elementos en grupo. Se emplea cuando $NCI \geq 2$. Mediante esta técnica es posible la reducción del número de paradas debidas principalmente a fallos, así como a una posible reducción del coste de mantenimiento.

En el caso de que la tarea de mantenimiento se realice sobre un grupo de elementos, el coste medio total para el tiempo operativo fijado, $TMCG^c(T_{st})$, viene dado por la ecuación (4.35).

$$TMCG^c(T_{st}) = MNFG(T_{st})CMTG^c, \quad (4.35)$$

donde $MNFG(T_{st})$ es el número esperado de tareas de mantenimiento de grupo realizadas el tiempo fijado, dado por la ecuación (4.36), y $CMTG^c$ es el coste de cada tarea correctiva realizada sobre el grupo de elementos, el cual viene expresado por la ecuación (4.36).

$$MNFG(T_{st}) = MNFG(T_{st})CMTG^c. \quad (4.36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} CMTG^c = CG_{sp}^c + CG_m^c + CG_p^c + CLRG^c, \\ CG_m < \sum_{j=1}^{NG} C_{m_j}, \\ CG_p < \sum_{j=1}^{NG} C_{l_j}, \\ CLRG < \sum_{j=1}^{NG} CLR_j, \end{array} \right. \quad (4.37)$$

siendo CG_{sp} el coste de los repuestos usados, CG_m el coste de material necesario para la sustitución del grupo, CG_p el coste de personal para la sustitución del grupo y $CLRG$ el coste de los ingresos perdidos a causa de la ejecución de la tarea de mantenimiento en un grupo de elementos.

En los casos en los que se realiza una tarea de mantenimiento sobre un grupo de elementos, el coste de mantenimiento por unidad de operación viene dado por la ecuación (4.38).

$$UMCG^p(TP) = \left[\frac{\sum_{j=1}^{NG} (MNF_j(TP)CMT_j^c + CMTG^p)}{TP} \right]_{\min}. \quad (4.38)$$

En ocasiones es posible combinar tareas de mantenimiento, NMS , realizadas sobre elementos individuales, NI , y sobre un grupo de elementos, NG , con el fin de poder optimizar el procedimiento de mantenimiento de los sistemas que constan de varios elementos críticos, NCI . El valor de NMS se determina por la ecuación (4.39).

$$NMS = 1 + \sum_{NG=2}^{NG=NCI} \binom{NCI}{NG} = 1 + \frac{\sum_{NG=2}^{NCI} NCI}{NG!(NCI - NG)!} \quad (4.39)$$

Los diagramas de bloques funcionales pueden modificarse para obtener un diagrama de nivel de mantenimiento según la localización de los elementos. El diagrama de bloques de fiabilidad de un sistema determinado representa el efecto del fallo del elemento sobre las prestaciones del sistema. Si se efectúa la sustitución en grupo de los elementos del mismo nivel de acceso, el coste total de cada sustitución se calcula según la ecuación (4.40).

$$CMTG^c = \sum_{i=1}^{i=NG} C_{spi}^c + C_m^c + C_l^c + CLRC. \quad (4.40)$$

El método de sustitución en grupo de elementos proporciona una reducción en el coste total, como resultado de una reducción en los costes de material, equipo usado, interrupción y personal por cada sustitución.

4.1.2 Mantenibilidad

Se entiende por mantenibilidad a la característica inherente de un elemento, relativa a su capacidad de poder ser recuperado cuando se lleva a cabo la tarea de mantenimiento adecuada, es decir, como la probabilidad de que un sistema operativo averiado sea devuelto a su condición operativa en un determinado intervalo de tiempo y mediante unos determinados procedimientos [36]. Se entiende por ingeniería de mantenibilidad a la disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad de un producto, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora [34].

En lo que respecta al tiempo requerido para la recuperación de la funcionalidad, éste ha de ser considerado en una etapa inicial del proceso de diseño, teniendo en cuenta la complejidad de la tarea del mantenimiento, accesibilidad de los elementos, seguridad de recuperación, facilidad de prueba, localización física del elemento, etc. La recuperación de la funcionalidad de un elemento podría ser considerado como un experimento aleatorio, y la transición del sistema de funcionamiento como el suceso elemental que corresponde al resultado de ese experimento.

La inferencia estadística es uno de los procedimientos más importantes para obtener las conclusiones más relevantes relacionadas con la mantenibilidad, empleándose principalmente métodos paramétricos. Los métodos paramétricos están asociados principalmente con la inferencia sobre determinadas medidas características de las distribuciones, como son la

media, mediana, moda, varianza, desviación típica, etc. Estos métodos se fundamentan en hipótesis explícitas sobre la normalidad de las distribuciones y los parámetros de la distribución [1] y [6].

Los ajustes a determinadas distribuciones están asociados con la inferencia sobre la distribución de probabilidad de la muestra, libre de hipótesis relativas a los parámetros de la población estudiada [35].

El desarrollo de un elemento que funcione correctamente numerosas veces es principalmente una tarea propia de diseño, con sólo una asistencia incidental por parte de la función de mantenibilidad. La mantenibilidad se encarga de los requisitos de diseño adicionales, precisos para asegurar que la funcionalidad de un diseño viable pueda ser mantenida fácil, segura y económicamente durante su funcionamiento en entornos especificados y otras condiciones operativas.

Los métodos de diseño para lograr la mantenibilidad son: accesibilidad, modularidad; simplicidad y normalización; ingeniería de factores humanos; capacidad de prueba; uso de recursos especiales de mantenimiento.

4.1.3 Fiabilidad

Se entiende por fiabilidad a la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado [48]. En la definición anterior caben destacar que la fiabilidad depende de la probabilidad, el funcionamiento adecuado, la calificación con respecto al entorno y el tiempo.

Para poder expresar la fiabilidad en términos matemáticos denotaremos a ϕ como aquella función que toma el valor 1 si el dispositivo o elemento funciona, y 0 en caso contrario, según se indica en la ecuación (4.41).

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{si el dispositivo funciona,} \\ 0 & \text{si el dispositivo no funciona.} \end{cases} \quad (4.41)$$

En el caso en el que el sistema esté formado por n componentes, se conoce con el nombre de vector de estado x a aquel vector formado por n variables x_i que representan el estado de cada componente i , tomando dichas variables el valor 1 si el componente que representan funciona correctamente y 0 en el caso contrario. Así pues, el estado del sistema ϕ se expresará según la ecuación (4.42).

$$\phi = \phi(x). \quad (4.42)$$

En el caso de que el estado del sistema sea constante en x_i , dicho componente será irrelevante a la estructura del sistema (ver ecuación (4.43)) siendo relevante en caso contrario. Así pues, un sistema de componentes es coherente si el estado del sistema ϕ no es decreciente en x , según se indica en la ecuación (4.44), y si cada componente del sistema x_i es relevante.

$$\phi(1_i, x) = \phi(0_i, x), \quad \forall x, \quad (4.43)$$

$$x > y \rightarrow \phi(x) > \phi(y). \quad (4.44)$$

Los componentes de un sistema pueden estar dispuestos en serie, paralelo, k-de-n o una combinación de las anteriores posibilidades.

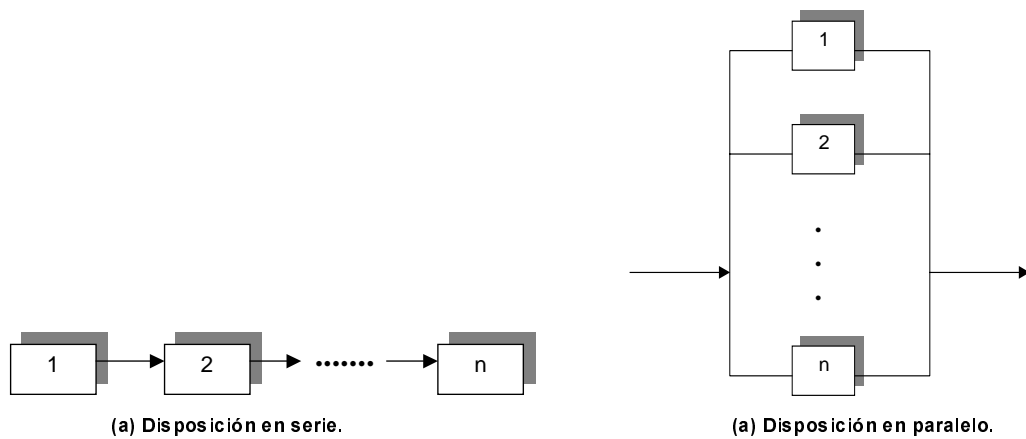


Figura 4.1.- Disposiciones en serie y paralelo de los componentes de un sistema

La disposición en serie se caracteriza por la necesidad del correcto funcionamiento de todos sus elementos para que el sistema funcione también correctamente, según se expresa en la ecuación (4.45).

$$\phi(x) = \prod_{i=1}^{i=n} x_i, \quad i = 1, \dots, n \Rightarrow \phi(x) = 1 \quad \text{si} \quad x_i = 1, \quad \forall i. \quad (4.45)$$

Un sistema en paralelo es aquel que funciona correctamente si al menos unos de sus componentes lo hace. Esto se puede expresar matemáticamente por la ecuación (4.46) [1].

$$\phi(x) = \prod_{i=1}^{i=n} x_i = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - x_i), \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.46)$$

Por último, un sistema k-de-n es aquel sistema en el que el funcionamiento de k cualesquiera de los n componentes del sistema implica el funcionamiento del sistema, según se indica en la ecuación (4.47).

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^{i=n} x_i \geq k, \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^{i=n} x_i < k. \end{cases} \quad (4.47)$$

Si suponemos que ϕ es una estructura que consta de un conjunto asociado de componentes, para los cuales $\rho_1(x)$, $\rho_2(x)$, ..., $\rho_J(x)$ son las funciones de ruta de los caminos mínimos y $\kappa_1(x)$, $\kappa_2(x)$, ..., $\kappa_L(x)$, son las funciones de estructura de camino mínimos, entonces tendremos la relación dada por la ecuación (4.48) (ver Anexo I).

$$\prod_{l=1}^{l=L} P[\kappa_l(x) = 1] \leq P[\phi(x) = 1] \leq \prod_{j=1}^J P[\rho_j(x) = 1] \quad (4.48)$$

Así pues, las funciones $\kappa_l(x)$ están asociadas y la equivalencia estructural origina la relación dada en la ecuación (4.49), así como para los caminos mínimos, dando lugar en este caso a la ecuación (4.50).

$$P[\phi(x) = 1] = P\left[\prod_{l=1}^{l=L} \kappa_l(x) = 1\right] \leq \prod_{l=1}^L P[\kappa_l(x) = 1] \quad (4.49)$$

$$P[\phi(x) = 1] = P\left[\prod_{j=1}^{j=J} \rho_j(x) = 1\right] \leq \prod_{j=1}^J P[\rho_j(x) = 1] \quad (4.50)$$

En el caso de que los componentes de la estructura coherente sean independientes, las relaciones dadas por las ecuaciones (4.49) y (4.50) se pueden expresar según la ecuación (4.51).

$$\prod_{l=1}^{l=L} \prod_{i \in C_l} p_i \leq P[\phi(x) = 1] \leq \prod_{j=1}^{j=J} \prod_{i \in P_j} p_i. \quad (4.51)$$

considerando que para una estructura coherente $\phi(x)$, P_1, P_2, \dots, P_J representan los conjuntos de caminos mínimos y C_1, C_2, \dots, C_n los conjuntos de cortes mínimos, cumpliéndose la relación dada por la ecuación (4.52).

$$\max_j \left\{ P \left[\min_{i \in P_j} x_i = 1 \right] \right\} \leq P[\phi(x) = 1] \leq \min_l \left\{ P \left[\max_{i \in C_l} x_i = 1 \right] \right\}, \quad (4.52)$$

donde la ecuación (4.52) para componentes asociados se puede expresar según la ecuación (4.53).

$$\max_j \left\{ \prod_{i \in P_j} p_j \right\} \leq P[\phi(x) = 1] \leq \min_l \left\{ \prod_{i \in C_l} p_i \right\}. \quad (4.53)$$

La importancia de la fiabilidad del componente i -ésimo, $I_R(i)$, de un sistema coherente indica la importancia de ese componente sobre la función de la fiabilidad del sistema, y se expresa según la ecuación (4.54).

$$I_R(i) = \frac{\delta}{\delta p_i} r(p) = r(1_i, p) - r(0_i, p) \quad (4.54)$$

Para una estructura en serie y en paralelo, $I_R(i)$ viene dado por las ecuaciones (4.55) y (4.56) respectivamente.

$$I_R(i) = \frac{\delta}{\delta p_i} r(p) = \frac{\delta}{\delta p_i} \prod_{j=1}^{j=n} p_j = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} p_j. \quad (4.55)$$

$$I_R(i) = \frac{\delta}{\delta p_i} r(p) = \frac{\delta}{\delta p_i} \left[1 - \prod_{j=1}^{j=n} (1 - p_j) \right] = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n} (1 - p_j) \quad (4.56)$$

4.1.4 Disponibilidad

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento [36]. Desde el punto de vista cuantitativo, la disponibilidad puntual, $A(t)$, de un dispositivo es la probabilidad de que funcione en cualquier instante de tiempo, según se expresa en la ecuación (4.57).

$$A(t) = P[x(t) = 1] = E[x(t)] \quad (4.57)$$

La disponibilidad límite A de un dispositivo viene dado por la ecuación (4.58).

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t). \quad (4.58)$$

La disponibilidad media \bar{A} en un intervalo de tiempo $[0, \tau]$ de un elemento o dispositivo se define según la ecuación (4.59).

$$\bar{A}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A(t) dt. \quad (4.59)$$

Por último, la disponibilidad media límite A_{∞} viene dada por la ecuación (4.60).

$$A_{\infty} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{A}(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A(t) dt. \quad (4.60)$$

De acuerdo con las ecuaciones (4.57), (4.58), (4.59) y (4.60) referentes a la disponibilidad, ésta se trasforma en fiabilidad cuando no es posible la reparación. \bar{A} representa la proporción de tiempo de funcionamiento de un dispositivo durante el intervalo $[0, \tau]$. Cuando el límite existe, entonces se cumple que $A_{\infty} = A$.

4.2 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad

4.2.1 Estado del arte

En 1974, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos redactó un estudio basado en el proceso usado por la aviación civil industrial para preparar programas de mantenimiento de aviones. Dicho estudio fue conocido con el nombre de mantenimiento centrado en la fiabilidad, *Reliability Centred Maintenance* (RCM) [51]. El trabajo llevado a cabo parte de una técnica desarrollada en 1965 basada en un diagrama de decisión, donde fue presentada en un artículo en *AIAA Commercial Aircraft Design and Operations Meetings*. Posteriormente esta obra se perfeccionó y fue publicada como un "handbook" acerca del desarrollo de programas y evaluación del mantenimiento, llamada MSG-1. Dicho documento dio origen posteriormente a MSG-2, titulado *Airline Manufacturer Maintenance Program Planning Document*. Ambos documentos fueron empleados para llevar a cabo diversos programas de mantenimiento aplicados a la industria aeronáutica.

El propósito de los documentos MSG-1 y MSG-2 fue desarrollar un programa de planificación del mantenimiento que asegurase la máxima seguridad y fiabilidad en la aviación al menor coste posible, dando origen y sirviendo de base a RCM. Dicho término se expresará en el presente texto como RCM₁ con la intención de distinguirlo del concepto de Remote Condition Monitoring, que se denotará como RCM₂.

La técnica de RCM₁ ha ido evolucionando en los últimos años, centrándose en el aseguramiento de la seguridad de los sistemas, dando origen a RCM-II [47]. Dicho concepto incorpora algunos cambios más con respecto al mencionado RCM₁, como es el asegurarse de que determinados componentes funcionen en lugar de que deben de funcionar, mayor eficiencia, cambios en los originales diagramas de decisión, etc.

RCM-II ha sido implantado con éxito en más de 1000 compañías interdisciplinarias de 41 países diferentes, como son empresas manufactureras, químicas, petroquímicas, servicios, construcción, ferroviarias, etc.

En 1980, the Air Transport Association of America (ATA), redactó el documento *Airline/Manufacturer Maintenance Program Development Document*, conocido como MSG-3 [39]. MSG-3 es una continuación de los anteriores documentos MSG-1 y MSG-2.

En la década de 1980, el grupo de investigación Electric Power Research Institute (EPRI) llevó a cabo dos aplicaciones de RCM₁ en la industria de centrales nucleares en Estados Unidos [70]. Como resultados más destacados de dicho trabajo fue la reducción de costes y el incremento de la disponibilidad de las centrales. Esta nueva adaptación de RCM₁ fue escogida para implantarse en otras centrales nucleares no consideradas de Estados Unidos en 1987. RCM₁ también se implantó, con determinadas modificaciones con respecto a la versión original, en el sur de África, así como en diversas industrias del Reino Unido. Todas estas mejoras dieron lugar al ya mencionado RCM-II.

En la década de 1990, US Naval Air Command redactó el texto *Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process (NAVAIR 00-25-403)* [74], y por otro lado British Royal Navy llevó a cabo el estudio *RCM-oriented Naval Engineering Standard (NES45)* [60], incorporaron ciertas mejoras al RCM-II.

La última referencia más notable fue aprobada por SAE, *Evaluation Criteria for Reliability-Centred Maintenance (RCM) Processes* (SAE 1011), aunque no representa un estándar de RCM₁ [28].

4.2.2 Situación actual del RCM₁ en el contexto del mantenimiento

La evolución del mantenimiento industrial se considera dividida en tres grandes fases. En la primera generación, transcurre desde el origen del mantenimiento hasta la segunda guerra mundial. En esta fase, en la industria no estaba muy mecanizada, por lo que el control de tiempos en las fábricas no tenía tanta importancia como la tubo en posteriores fases. Además, la maquinaria de las que disponían no eran complejas, por lo que los fallos que se daban eran fácilmente reparables [47]. En la Figura 4.2 se representa la evolución que ha sufrido el interés del mantenimiento en los últimos años.

En la segunda generación, la cual surge tras la segunda guerra mundial, el interés del mantenimiento cambia de forma notable. La industria sufrió una gran mecanización, cuyas maquinarias eran más complejas. Además, a las fábricas se les exigía mayor disponibilidad. Así pues, las tareas del mantenimiento cambiaron para hacer frente a estas exigencias. Como consecuencia de esto, surge el mantenimiento preventivo. Esto permite la mejora en la planificación del mantenimiento y en los sistemas de control.

La tercera y última generación, cuyos orígenes se sitúan a finales de la década de 1970, viene marcada por la incorporación de las nuevas tecnologías, líneas de investigación y nuevos campos de aplicación del mantenimiento. Surge la preocupación por disminuir el tiempo no operativo de los elementos o sistemas, e incluso de eliminarlo en muchos casos, por causa de fallos. Ello ha permitido la mejora de la disponibilidad y la seguridad de los equipos, siendo estos dos factores claves para el diseño del mantenimiento. Otras causas que han influido en el nuevo concepto de mantenimiento han sido la calidad requerida en las instalaciones, la seguridad y la reducción de costes. RCM₁ se situaría en la última generación. Entre las mejoras incorporadas en el mantenimiento son las herramientas de soporte para la toma de decisiones, tanto de tipo hardware como software, nuevos equipos de diseño y factores relacionados con la organización, tanto materiales como humanos, para llevar a cabo las tareas propias de mantenimiento.

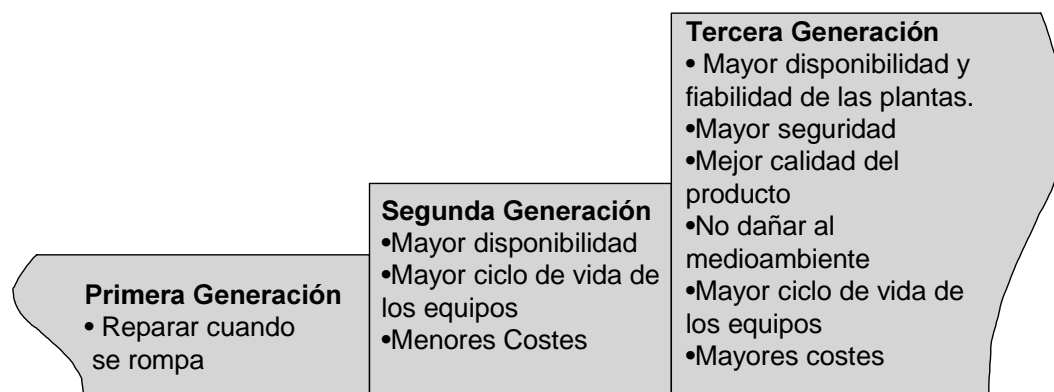


Figura 4.2.- Evolución de los campos de interés del mantenimiento

4.2.3 Principales etapas en el desarrollo e implementación de RCM₁

En la primera etapa de RCM₁ se determina lo que el usuario quiere hacer, de acuerdo con los diferentes estándares. Dichas funciones se dividen en dos grupos: funciones primarias, que contemplan aquellas que se consideran más relevantes en función de diversos parámetros; y funciones secundarias, que contemplarían aquellas funciones no primarias. Según diversos estudios, esta clasificación de funciones requiere el 30 % del tiempo en llevar a cabo el RCM₁.

Seguidamente, se determinan los fallos funcionales en la siguiente fase de RCM₁, identificando por un lado las circunstancias de un estado de fallo, y por otro determinando los eventos que causan dicho estado de fallo.

La determinación de los fallos funcionales permitirá establecer los modos de fallos, es decir, determinar los orígenes razonablemente probables que causan los fallos.

También se ha de identificar los efectos de los fallos funcionales, es decir, lo que sucedería si se produjeran dichos fallos, así como las consecuencias de los fallos. En muchas ocasiones, el estudio de las consecuencias tras el fallo es más importantes que la determinación de las características técnicas del equipo o elemento. Las consecuencias pueden ser:

- Consecuencias de fallos ocultos.
- Consecuencias relacionadas con la seguridad (humana y material) y el entorno.
- Consecuencias operacionales.
- Consecuencias no operacionales.

Las acciones para prevenir dichas consecuencias pueden ser pro-activas y activas. Las acciones pro-activas son tenidas en cuenta antes de que el fallo se produzca, mediante la aplicación de actividades de mantenimiento, como preventivas o predictivas. Las acciones activas son las consideradas en el momento de producirse el fallo.

Una de las propiedades más destacadas del RCM₁ es la forma simple, precisa y sencilla de emplear el criterio para decidir cuál o cuáles de las acciones pro-activas es técnicamente viable en cualquier contexto, si las hubiera, y de este modo favorecer con qué frecuencia se deben de tomar dichas acciones y quién debería llevarlas a cabo. A continuación se enumeran los criterios más empleados en la selección de dichas acciones:

- Para fallos ocultos, es conveniente adoptar una acción pro-activa si con ello se reduce el riesgo de generación de múltiples fallos asociados con esta acción con un bajo nivel de tolerabilidad. Si esta acción no se puede alcanzar, la acción planificada para encontrar fallos debería ser mejorada.
- Para fallos con consecuencias en la seguridad y en el entorno, una acción pro-activa es la única acción que se debería adoptar, siempre que con ello se reduzca

el riesgo de que se produzca el fallo. Si esto no fuera así, el elemento debería ser reparado o reemplazado.

- Si el fallo tiene consecuencias operacionales, la acción pro-activa debe ser adoptada si con ello el coste de la acción en el periodo de tiempo que se lleva a cabo es menor que el coste de las consecuencias operacionales y el coste de reparación en el mismo periodo considerado, es decir, si la acción considerada está económicamente justificada.
- Si el fallo no tiene consecuencias operacionales, la acción pro-activa debe ser tomada si el coste que ocasiona en un periodo de tiempo determinado es menor que el coste de reparación.

4.2.4 Proceso de aplicación del RCM₁

Antes de establecer las acciones de cualquier organización para establecer los requerimientos de mantenimiento, se precisa saber qué acciones son y decidir cuáles de ellas están sujetas a proceso de revisión en RCM₁. Esto significa que debe ser preparado un registro de planta si este no existiera. A continuación se describen las principales funciones a llevar a cabo:

Planificación. Si la planificación está bien aplicada, RCM₁ permitirá mejorar la eficiencia del mantenimiento y acelerar su proceso. En cambio, el éxito en la aplicación de RCM₁ depende de planificaciones precisas. Las claves del proceso de la planificación son los siguientes:

- a) Decidir qué actividades son las más probables para favorecer el proceso RCM₁, y si es así, cómo lo beneficiarán.
- b) Acceso a los recursos requeridos para aplicar el proceso a las acciones seleccionadas.
- c) En los casos donde sea probablemente justificado el beneficio de la inversión, decidir en detalle quién es el que la llevará a cabo y quién ha de auditar cada análisis, cuándo y dónde, y decidir para dichas personas un entrenamiento y formación adecuados.
- d) Asegurarse que las operaciones del contexto de cada acción han sido bien entendidas.

Grupos de revisión. Con la intención de revisar los requisitos de mantenimiento de cada acción, se ha de disponer de un pequeño equipo de personas, como el mostrado en la Figura 4.3, entre los que debería haber al menos uno perteneciente a funciones de mantenimiento y otro a funciones de operación. El personal que constituya estos grupos deben estar formados adecuadamente en RCM₁.

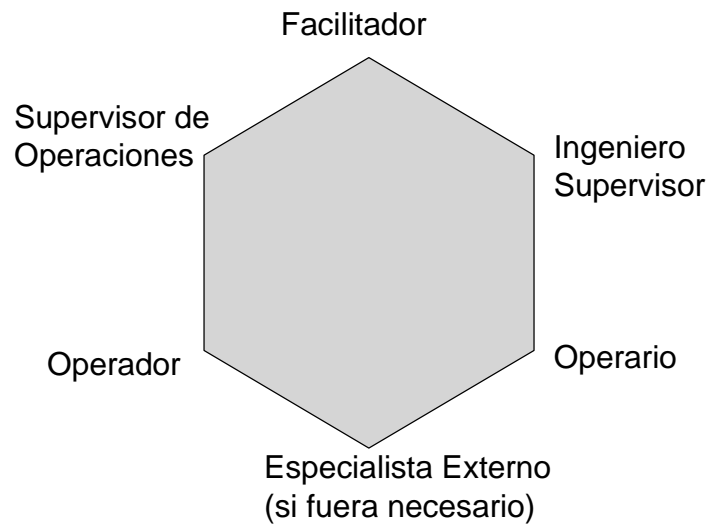


Figura 4.3.- Ejemplo de un grupo de revisión de RCM₁

Facilitadores. Los grupos de revisión de RCM₁ trabajan bajo la supervisión y guiados por un especialista en RCM₁, conocido por el nombre de facilitador. El facilitador es la persona más importante en el proceso de revisión de RCM₁. Su rol puede definirse de la siguiente manera:

- El análisis de RCM₁ es llevado a cabo a un nivel adecuado, en el cual los límites del sistema están claramente definidos, los elementos no importantes no se consideran en profundidad y los resultados del análisis son almacenados apropiadamente.
- RCM₁ es correctamente entendido y llevado a cabo por los miembros del grupo.
- El grupo alcanza consensos en una actividad de forma ordenada, mientras se conserva el entusiasmo y compromiso de cada miembro.
- El análisis progresa correctamente según los plazos establecidos y finaliza en el tiempo prefijado.

Resultados de un análisis de RCM₁. Si se aplican las sugerencias anteriores, el análisis de los resultados de RCM₁ suele establecerse dentro del marco de un triángulo formado por los siguientes vértices:

- La programación del mantenimiento ha de ser realizada por miembros del departamento de mantenimiento.
- Los procedimientos de revisión de operaciones ha de hacerla el operador de las acciones.
- Debe existir una lista de áreas donde los cambios que realicen en el diseño de la acción, o en la manera en la que debe ser llevada a cabo, para no permitir situaciones donde la acción no pueda alcanzar la mejora deseada en su actual configuración.

Al menos dos vértices del triángulo son aquellos miembros del proceso que lleguen a un importante pacto acerca de cómo establecer las tareas, y por tanto tender a que las funciones y equipos mejoren.

Auditorías e implementación. En el momento en el que la revisión de cada acción ha sido completada, los especialistas en el tema deben garantizar que las decisiones acordadas por el grupo sean factibles y pueden ser llevadas a cabo.

Tras la aprobación de cada revisión, las recomendaciones son implementadas mediante la incorporación de nuevos horarios de mantenimiento en su planificación y en su sistema de control, mediante la incorporación de cambios en la forma de operar dentro de los procedimientos estándares de operación de cada acción.

Entre las principales ventajas que se obtienen aplicando RCM₁ están:

- Mayor seguridad e integración con el entorno.
- Mejora del rendimiento de la operación.
- Mayor relación coste-eficiencia del mantenimiento.
- Mayor vida útil de los elementos más costosos.
- Una completa base de datos.
- Mayor motivación de los individuos.
- Mejor equipo de trabajo.

4.3 Monitorización remota basada en la condición

El fin último de la monitorización remota basada en la condición, Remote Condition Monitoring, en adelante RCM₂³ es obtener la información básica y necesaria del estado del equipo que está siendo controlado, analizando las variables de manera que se pueda llevar a cabo un correcto uso y mantenimiento del equipo [17] y [19]. Actualmente, el gran avance de las nuevas tecnologías ha hecho que dicho concepto se extienda también a la adquisición, preprocesamiento y almacenamiento de datos. Esto implica mejoras de la seguridad, calidad, productividad y disponibilidad, así como una disminución de costes y de tiempos no operativos del equipo. Estas mejoras no se consiguen tan solo en el equipo, sino que directa e indirectamente influyen en el resto del sistema. En la Figura 4.4 se representa esquemáticamente el funcionamiento de un sistema RCM₂.

Los objetivos básicos del RCM₂ son el control y seguimiento, la protección, el diagnóstico y alargar la esperanza de vida del elemento o equipo.

³ La mayoría de los autores emplean las siglas RCM para referirse a Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad, Reliability Centered Maintenance

El mantenimiento en general, y en particular el mantenimiento predictivo, está siendo desarrollado e implantado actualmente en numerosas empresas. En estos casos, las estrategias de la empresa dependen de la monitorización continua o periódica del estado de los equipos. RCM₂ podría no sólo mejorar la disponibilidad en estos casos, sino que podría mejorar la relación coste-eficiencia. Algunos de los factores que influyen son: el ahorro económico, la mejora de la disponibilidad y el detectar de forma automática los fallos y posibles anomalías de equipos, distinguiendo entre ellos el rumbo normal de los parámetros que están siendo monitorizados y los indicios de fallos [16] y [17].

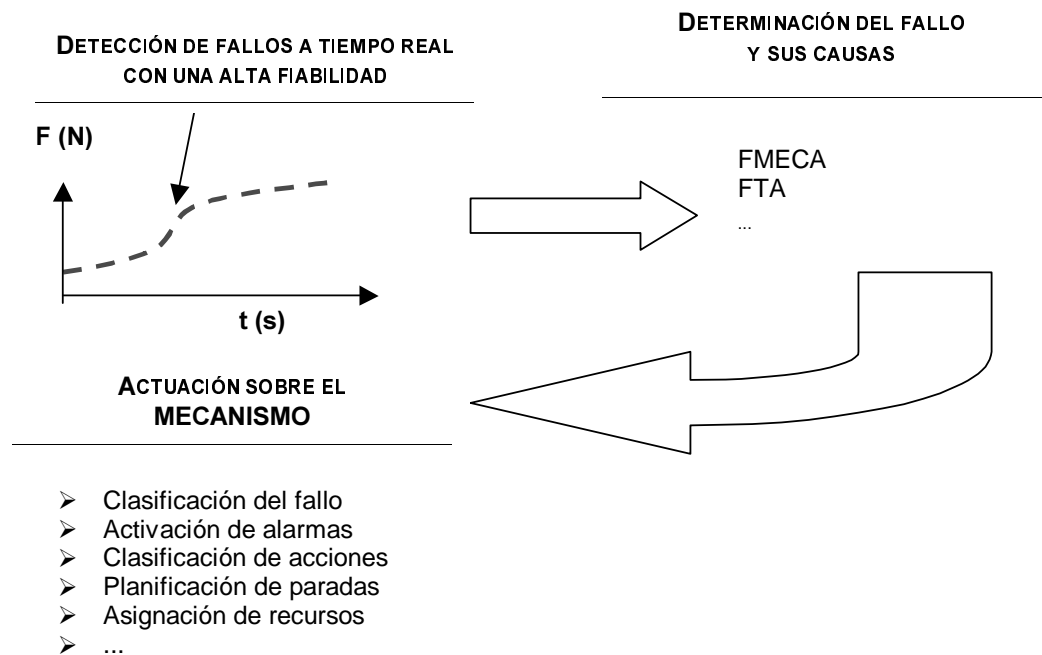


Figura 4.4.- Esquema básico de RCM₂

Otro aspecto importante a considerar es la factibilidad la telemetría remota en RCM₂. Para aplicaciones en la infraestructura ferroviaria existen principalmente dos opciones, para integrar las necesidades de la telemetría remota de sistemas de monitoreo condicionado con la infraestructura de telecomunicaciones existente y el uso disponible del ancho de bandas y otra para introducir canales de comunicación independientes por otro. Aspectos como la inmunidad electromagnética, fiabilidad y coste son actualmente objeto de estudio en RCM₂. Investigaciones recientes dentro de la estructura ferroviaria se han centrado en el uso de la fibra óptica y sus aplicaciones en las necesidades de RCM₂ [18] y [69].

En muchas ocasiones, cuando se está analizando una señal que representa la condición de un determinado elemento o sistema para poder determinar su estado, se precisa de determinados instrumentos y/o algoritmos con el fin de poder determinar el estado del elemento o sistema. Para estos casos se suele emplear la técnica RCM₂ anteriormente descrita. Las

distintas técnicas de mantenimiento que se han desarrollado dentro del concepto RCM₂ se pueden clasificar en función del efecto del tipo de señal que se está analizando [47].

Sería prácticamente imposible poder mencionar y describir todas las técnicas existentes, básicamente por el enorme número de éstas y porque actualmente están surgiendo continuamente un gran número de nuevas técnicas. A continuación se describen las más significativas en función de los efectos dinámicos, partículas, térmicos, eléctricos, químicos y físicos.

4.3.1 Efectos dinámicos

La monitorización de señales relacionadas con la dinámica del elemento o sistema detecta fallos potenciales, los cuales pueden causar, por ejemplo, deformaciones en la señal que está siendo tratada, como es en la forma de la onda o las vibraciones. Este tipo de técnicas se suelen emplear en elementos rotativos, como rodamientos, ejes rotatorios, cojinetes, etc. Las técnicas más importantes se describen a continuación:

Análisis de la vibración

En algunos elementos o sistemas en el momento en que se produce un fallo, o simplemente una incidencia, se puede observar analizando sus vibraciones. Este tipo de técnicas se emplean principalmente en máquinas como bombas, compresores, turbinas, etc., que contienen numerosos elementos rotatorios [55] y [61].

Los parámetros que suelen caracterizar a la vibración son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, por lo que se emplean tres tipos diferentes de transductores, uno para cada parámetro mencionado, para poder medir la vibración.

El equipo empleado para el estudio de las vibraciones consta, básicamente, de:

- Dispositivo de adquisición de datos, cuyo elemento principal es un transductor de posición, velocidad, aceleración o varios de ellos.
- Dispositivo de procesamiento de la señal, como son los empleados en el análisis de series temporales, espectro de frecuencias, analizadores de señales dinámicas (DSA) etc.
- Técnicas y algoritmos para poder determinar la condición de la máquina, como son el empleo de transformadas de Fourier (FFT).

Los defectos más importantes detectados mediante el análisis de las vibraciones son el desequilibrio, desalineación, ejes doblados, engranajes gastados, excéntricos o dañados, cadena y correas en mal estado, cojinetes antifricción en mal estado, variaciones de par, holguras, rozamientos, resonancias, excentricidades, defectos de lubricación en cojinetes de fricción y falta de rigidez.

Análisis del ancho de banda

Mediante el análisis del ancho de banda se pueden detectar numerosas incidencias y fallos en el elemento o sistema que está siendo estudiado. Normalmente, este análisis se lleva a cabo en la señal relativa a vibraciones. Se emplean registradores gráficos conectados a los medidores y analizadores de vibración.

Esta técnica normalmente es empleada para detectar alteraciones que mediante el análisis de vibraciones clásico no se detectarían, ya que éstas pueden producirse en el transcurso del tiempo [15].

Análisis del espectro de frecuencias de la vibración

El empleo de esta técnica se suele dar en el análisis de fallos en máquinas rotativas, pudiéndose detectar el 85 % de ellos [1]. Algunas de las herramientas más importantes emplean, por ejemplo, un filtro sintonizable manual, el barrido automático de frecuencias o un analizador en tiempo real. Estas herramientas permiten la obtención del espectro frecuencial de la vibración. El análisis de estas frecuencias, junto con la información referente, por ejemplo, a la velocidad de giro del elemento o sistema que está siendo estudiado (frecuencia fundamental), pueden informar acerca del estado del elemento. Para ello, se suele disponer en distintas referencias cuadros y tablas de diagnóstico que faciliten dicho análisis [42] y [41].

Análisis de la amplitud de la vibración en función de la frecuencia y de la velocidad (espectros en cascada)

Se entiende por espectros en cascada a la representación de un espectro en varios intervalos de tiempos, normalmente representados en tres dimensiones. En estos casos, en el eje x se representa la frecuencia, en el eje y la amplitud y en el eje z la velocidad o el tiempo de la vibración. Todos los picos de frecuencia relacionados con la velocidad de giro, o algún múltiplo de ésta, se desplazarán en el eje x, mientras que los que corresponden con frecuencias fijas, como son, por ejemplo, los originados en los motores eléctricos por armónicos que circulan en la red eléctrica, se desplazarán a lo largo del eje z.

Estos gráficos son empleados normalmente en operaciones de arranque y paradas de máquinas, así como en casos de cambio de carga, temperatura u otras condiciones operativas objeto de estudio.

Análisis de orbitales

El análisis de orbitales se fundamenta en el estudio de la órbita del eje rotatorio, es decir, del análisis de la posición del mismo a lo largo del tiempo. Para ello, se suele emplear un transductor de posición [8].

Usualmente se emplea un soporte fijo en el que se disponen ortogonalmente dos sensores de proximidad en un mismo plano perpendicular al eje de la máquina, y separados estos planos del eje a una distancia dada. De esta forma, de cada uno de los sensores se obtiene una medida unidireccional de la posición del eje a lo largo del tiempo, las cuales permiten conformar la órbita descrita por el centro del eje que está siendo objeto de estudio [1].

También se suele emplear el osciloscopio de dos canales para estudiar la órbita. Cada uno de los canales toma una señal de los sensores, analizando con ellos los desplazamientos horizontales y verticales del movimiento del eje por separado. Cuando la velocidad del eje es lo suficientemente lenta, se puede observar la evolución del punto representativo del centro del eje, pero a medida que la velocidad aumenta, las posiciones sucesivas del punto se van superponiendo en cada vuelta del eje, formando orbitales en los que no es posible distinguir la posición del centro del eje en cada instante. Para solventar este problema se introduce una señal de fase en la entrada de control de intensidad, lo que produce una interrupción en el trazo de la órbita seguido de una señal que destaca del resto. La forma de las órbitas dependerá básicamente del valor de las amplitudes en cada dirección, así como del ángulo de fase entre ambas [76].

Mediante el empleo de esta técnica se pueden detectar posibles problemas relacionados con el desalineamiento del eje y de ajuste del eje con el cojinete o con el rodamiento.

Análisis de la forma de onda

Esta técnica suele emplearse de apoyo o de complemento a otras técnicas, ya que por sí sola no aporta mucha información, aunque dicha información sirve para poder detectar diferentes anomalías empleando otras técnicas de análisis.

El osciloscopio es el instrumento más empleado para el análisis de la forma de onda, así como determinados analizadores gráficos empleados para estudiar la señal mediante el uso del ordenador.

Análisis de la amplitud y fase en función de la velocidad de giro

Mediante un análisis de la amplitud en relación con el tiempo, así como con la relación de la velocidad de giro en un arranque o parada, es posible determinar las frecuencias resonantes [1].

Estas resonancias se caracterizan por un cambio de 180° en el ángulo de fase. El equipo de medida consiste básicamente en el empleo de sensores que midan la velocidad de giro, la amplitud de la vibración y el ángulo de fase.

El gráfico de Bode se emplea para estudiar las variables mencionadas en el párrafo anterior. En dicho gráfico se representa, en el eje de abscisa, la velocidad de giro y, en la ordenada, la amplitud y el ángulo de fase.

El gráfico de Nyquist consiste en la representación polar de la amplitud y el ángulo de fase. El gráfico viene determinado por el conjunto de puntos generados por el vector rotativo al variar la velocidad de giro.

Análisis del valor de pico o cresta

Normalmente se emplea el estudio de la fase de una vibración para determinar la relación del valor de pico de la onda, conocido como cresta, con respecto a un punto fijo. Éste activa a un sensor de paso que registra, bien óptica o electromagnéticamente, cada vuelta del rotor. Este tipo de análisis se suele emplear en la técnica de equilibrado.

Spike Energy

Spike Energy es una técnica empleada en el análisis de muy altas frecuencias, la cual se obtiene normalmente mediante un acelerómetro. Se suele emplear en el mantenimiento predictivo y/o preventivo de rodamientos. La unidad empleada en esta técnica es el dSE [57] y [58].

El ruido originado en el elemento o sistema consiste básicamente en una sucesión de pulsos. Cada pulso puede estar provocado por el impacto de una bola o rodillo de un rodamiento sobre su pista. Estos pulsos tienen un gran valor de su factor de curtosis y con un periodo muy pequeño, característico de una señal de alta frecuencia [43].

El seguimiento de los datos referentes al Spike Energy y el análisis de su evolución, conjuntamente con los datos de velocidad y aceleración, se emplea para diagnosticar diversos fallos o incidencias en diversas tareas de mantenimiento predictivo.

Análisis de la Curtosis

Cuando la distribución de probabilidad está cercana a la media de la distribución se origina apuntamiento o curtosis. Este fenómeno puede informar acerca de numerosos fallos que se estén dando en el mecanismo o elemento [53]. Esta propiedad se puede valorar mediante el coeficiente de curtosis, CC, que se define según la ecuación (4.61),

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^4}{ns^4}, \quad (4.61)$$

siendo n el tamaño de la muestra que está siendo analizada, \bar{x} la media de la muestra, definida según la ecuación (4.62), y s la desviación típica de la muestra, dada por la ecuación (4.63). Siempre se ha de cumplir que $CC \geq 1$.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}, \quad (4.62)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (4.63)$$

Análisis de ultrasonido

Esta técnica permite determinar fuentes de ultrasonidos, como pueden ser los originados por fugas de vapor o de gas, problemas en purgadores, efecto corona en conductores eléctricos, etc.

Investigaciones recientes han demostrado que una adecuada monitorización de los rodamientos mediante ultrasonidos puede detectar los fallos potenciales de los mismos [77].

Emisión acústica

La emisión acústica describe un fenómeno mecánico-estructural que consiste en la generación de ondas no estacionarias producidas por la liberación rápida de energía en fuentes localizadas dentro de un medio sólido [40].

La principal ventaja del método de emisión acústica consiste en el hecho de que, a diferencia con otras técnicas similares (como ultrasonido, rayos X, etc.), no requiere realizar un estudio "puntual" del medio en cuestión, ya que es suficiente utilizar un transductor sensible que detecte el fenómeno. Este transductor puede estar muy alejado del punto donde se genera la onda de tensión. Por otra parte, es posible, mediante el empleo del método de emisión acústica caracterizar zonas de un elemento o de una estructura, las cuales podrán ser estudiadas posteriormente en detalle mediante otras técnicas de ensayo no destructivo.

Los principales defectos o incidencias que se pueden detectar son la deformación plástica y cortante de una pieza, colisiones, roturas, etc. El nivel de emisión acústica depende de diversos factores como son: la velocidad de los elementos, dureza del material, su lubricación, etc.

4.3.2 Efectos partículas

La monitorización de las partículas detecta fallos potenciales en función de la forma y tamaño de las partículas extraídas de la zona o del entorno de trabajo del elemento. La técnica más empleada en la monitorización de las partículas es el análisis de los lubricantes y el conteo de partículas.

Como consecuencia del desgaste de los equipos, determinadas partículas de origen metálico, fibroso, plástico, etc., se depositan en el lubricante [21]. El análisis de la forma, tamaño, color y composición de estas partículas permiten, en muchos casos, detectar el origen y/o las causas de determinados fallos o incidencias, siendo normalmente éstas como consecuencia, normalmente, del desgaste.

Los métodos para analizar los contaminantes provocados por el desgaste pueden clasificarse como:

- *Método de detección directa.* El contaminante en el lubricante es detectado en la máquina haciéndolo circular a través de un dispositivo sensible a la presencia de partículas [52].
- *Métodos de recolección de partículas.* Las partículas de desgaste son recolectadas en un dispositivo, normalmente fijo a la máquina y desmontable fácilmente, del cual se extraen las que van a ser analizadas.
- *Métodos de análisis de partículas.* Este método consiste en extraer una muestra a lubricante de la máquina, la cual se analiza empleando técnicas como la espectrometría (de emisión de partículas o de absorción atómica), ferrografía, análisis de viscosidad, constante dieléctrica, mancha de aceite, trivector, temperatura de inflamación, etc. [65].

4.3.3 Efectos térmicos

Técnicas de monitorización de temperaturas son empleadas en aquellos elementos o sistemas en los que un cambio de la misma puede ser representativo de un fallo.

La termografía, por ejemplo, es una técnica que utiliza la fotografía infrarroja para identificar efectos en los dispositivos eléctricos y electromecánicos. Esta técnica de análisis permite controlar el estado de calentamiento de un material, además de permitir visualizar el nivel calórico de una superficie mediante la radiación térmica considerada en la medición [13]. Los principales fallos e incidencias que, mediante el empleo de esta técnica, se pueden detectar son de origen:

- a) Mecánico, como fricciones anormales entre cojinetes y ejes; sobrecargas físicas, etc.;
- b) Eléctrico, como resistencias de contactos por un consumo de corriente idéntico, malas conexiones eléctricas, sobrecarga en distintos dispositivos eléctricos, etc.

- c) Térmicos, como son tubos de horno hendidos, degradaciones de refractarios, variaciones de aislamiento de bobinados de motores, defectos de hermeticidad térmica, etc.

4.3.4 Efectos eléctricos

La monitorización de propiedades eléctricas como la conductibilidad, la resistencia, etc., pueden informar acerca de determinados fallos en el elemento o sistema.

Una de las técnicas más importante empleada es el espectro de corriente, utilizada para analizar la condición de la máquina de un motor mediante el estudio de la corriente de éstos, detectando con ello fallos como, por ejemplo, roturas de barras del rotor, excentricidad del rotor o bobinados con cortocircuitos, etc. [14].

4.3.5 Efectos químicos y/o físicos

La monitorización de determinadas propiedades químicas, cualitativas o cuantitativas, relacionadas con el elemento informan acerca de posibles fallos o incidencias.

Cambios en determinadas propiedades físicas del elemento o de su entorno pueden ser detectados empleando técnicas de monitorización, las cuales pueden informar de determinados fallos potenciales.

4.4 RCM² aplicado a los sistemas ferroviarios

Las estrategias en la dirección del mantenimiento de ferrocarriles han tenido gran importancia desde los años cuarenta [67]. En un principio, la industria ferroviaria ha estado por delante de otras industrias en este campo, desarrollando un programa de mantenimiento estratégico con controles periódicos sobre fallos en los equipos de las locomotoras [12]. Posteriormente, la relación entre el coste y los parámetros óptimos del mantenimiento hace que se tenga que escoger entre implantar un mantenimiento preventivo o bien uno correctivo [60]. En este mismo periodo, la mayoría de las aplicaciones en el desarrollo de la dirección de mantenimiento han estado centradas en el concepto de mantenimiento basado en la fiabilidad, RCM₁ (Reliability-Centred Maintenance). RCM₁, como se ha comentado en secciones anteriores, es una metodología de análisis objetivo, sistemático y documentado, centrado en el mantenimiento preventivo y/o predictivo de los elementos críticos del producto, así como en un mantenimiento correctivo en los elementos no críticos de dicho producto [51]. El punto de inicio para el proceso es el análisis de las funciones del equipo, fallos posibles, modos de fallos y criticidad de sus efectos (consecuencias del fallo), con el objetivo principal de determinar los elementos críticos del equipo.

Esto es básicamente el mismo proceso que el experimentado por la fabricación de equipos en sus etapas de diseño, conocido como Modos de Fallos y Análisis Crítico de sus Efectos

(FMECA, Fault Mode and Effect Criticality Analysis) [11] y [44]. La diferencia principal entre FMECA y RCM₁ es que el primero se basa en el conocimiento del fabricante sobre el fallo potencial en el diseño de un nuevo producto, mientras que RCM₁ es un sumario de numerosos años de experiencia de las operaciones de mantenimiento acerca del mismo producto. Estas herramientas, no obstante, no están totalmente desarrolladas e implantadas, y en muchos casos se aplican de forma manual y guiándose por la intuición. El centro de investigación EPSRC (The Engineering and Physical Sciences Research Council) [70] ha desarrollado un FMECA automático empleando sistemas expertos. Una reciente línea de investigación relacionada con la implantación de este tipo de mecanismos consiste en el desarrollo de modelos coste-beneficio dentro de las estrategias del RCM₁, con el objetivo de cuantificar y analizar las relaciones entre el coste-eficiencia y la mejora de la fiabilidad y disponibilidad en los sistemas ferroviarios [72].

Las fases principales a llevar a cabo en el RCM₁ son:

- a) Planificación del estudio. En esta primera fase, su objetivo principal es:
 - Definir los propósitos del estudio.
 - Hacer una selección de los principales propósitos.
 - Precisar los recursos necesarios.
 - Establecimiento del proceso técnico a llevar a cabo en el desarrollo del diseño de RCM₁.
 - Formación e información de dicho estudio al personal implicado.
- b) Identificación de la criticidad de los componentes del sistema en función de la probabilidad de fallo y su gravedad, y clasificación de dichos componentes. Entre las técnicas empleadas en esta fase, cabe destacar el análisis de los modos de fallos y de sus efectos (AMFE) [11] y la lista de criticidad (LC).
- c) Selección de los componentes críticos, donde se evaluarán y asignarán las funciones críticas de la anterior fase. Una vez definido esto, se determinarán las correspondientes funciones a llevar a cabo en el RCM₁ para cada componente.
- d) Las funciones definidas para ser llevadas a cabo por RCM₁ son comparadas con las actuales funciones de mantenimiento. Como resultado, se abolirán funciones actuales que se crean prescindibles, se implantarán nuevas funciones propuestas por el RCM₁ y que no están desarrolladas en las actuales funciones de mantenimiento, y siendo conservadas o mejoradas las funciones que sean contempladas tanto por el RCM₁ como por el actual sistema de mantenimiento.
- e) Redacción de un nuevo plan de mantenimiento. Las recomendaciones dadas en la fase anterior son redactadas en un nuevo plan de mantenimiento, donde se detallarán los correspondientes cambios en la asignación de tareas, recursos y operarios, las formas de trabajar, los canales y medios de información, así como las distintas implicaciones que condicionan a los restantes subsistemas.

- f) Una vez implantado el nuevo plan de mantenimiento, se debe realizar un preciso control de los resultados. Para ello es necesario definir los parámetros e índices de seguimiento, así como sus correspondientes procesos de captación y tratamiento de datos. La aplicación de las nuevas tecnologías referentes a los distintos sensores, medios de control, transmisión de información, etc., dan origen a la monitorización remota basada en la condición (RCM₂, Remote Condition Monitoring).

Por monitorización remota basada en la condición, RCM₂, se entiende, basándose en lo comentado en secciones anteriores, como la medición de una variable física representativa de la condición de la máquina, y la comparación de esta variable con valores que caracterizan el estado del equipo [17]. El fin último de RCM₂ es obtener la información básica y necesaria del estado del equipo que está siendo controlado, analizando para ello las variables físicas, de manera que se pueda llevar a cabo un correcto uso y mantenimiento del equipo [16].

Actualmente, el gran avance de las nuevas tecnologías ha hecho posible que dicho concepto se extienda también a la adquisición, preprocesamiento y almacenamiento de datos. Esto implica mejoras en seguridad, fiabilidad, productividad y disponibilidad del equipo, así como una disminución de costes y de tiempos no operativos. Estas mejoras no se consiguen tan solo en el equipo, sino que, directa e indirectamente, influyen en el resto del sistema.

A continuación se describen los objetivos básicos del RCM₂:

- a) *Seguimiento*. El objetivo es llevar a cabo un control del estado del sistema, detectando fallos y clasificando a estos según la gravedad del mismo.
- b) *Protección*. El propósito es evitar fallos graves o irreparables, llegando a parar el sistema según la gravedad y las posibles consecuencias del fallo.
- c) *Diagnóstico*. Tan importante es detectar el fallo como es identificar las causas que lo originaron. Esto ayudará a desarrollar un adecuado mantenimiento del equipo.
- d) *Estimación de la esperanza de vida*. Uno de los propósitos principales es alargar, tanto como sea posible, el ciclo de vida del equipo, así como optimizar su disponibilidad y tiempo de trabajo.

RCM₂ está siendo desarrollado e implantado actualmente en numerosas empresas. En estos casos, las estrategias de mantenimiento de la empresa dependen de la monitorización continua o periódica del estado de los equipos. RCM₂ podría no sólo mejorar la fiabilidad, sino que podría mejorar también la relación coste-eficiencia. Algunos de los factores que influyen son: el ahorro económico, la mejora de la fiabilidad y el detectar de forma automática los fallos y posibles anomalías de equipos, distinguiendo entre el rumbo normal de los parámetros que están siendo monitorizados y los indicios de fallos [16]. Investigaciones recientes dentro de la

estructura ferroviaria han estudiado el uso de la fibra óptica y sus aplicaciones en las necesidades del RMC₂ [18] y [27].

RCM² es el resultado de desarrollar conjuntamente los dos conceptos RCM_i, mantenimiento basado en la fiabilidad y monitorización remota basada en la condición (RCM₁ y RCM₂ respectivamente) con las ventajas de usar los avances en la electrónica, control, ordenadores y tecnologías de comunicación para conseguir mejorar los objetivos de la relación coste–eficiencia, la seguridad, la fiabilidad y los servicios. La aplicación de esta estrategia es multidisciplinar, la cual requiere de una amplia gama de especialidades de la ingeniería. Centrándonos en el transporte ferroviario, RCM² la integración de las actividades de diseño, fabricación, operación y mantenimiento. La señalización ferroviaria, dentro de la infraestructura ferroviaria, es un importante caso donde se ponen de manifiesto sus propiedades.

A continuación se enumeran las principales ventajas de emplear el RCM² en los sistemas ferroviarios (ver Figura 4.5), en función de los costes, productividad, gastos de capital y, la más importante, la seguridad en el transporte ferroviario.

a) Mejora de la seguridad.

- Asignación precisa de tareas preventivas y correctivas.
- Medidas concretas de prevención de accidentes en los trabajos de mantenimiento.
- Reducción de los fallos críticos y catastróficos.
- Identificación y prevención de fallos antes de que se hayan producido.

b) Reducción de costes de mantenimiento.

- Mejora de la eficiencia del personal.
- Reducción del tiempo y el número de paradas del mecanismo.
- Minimización del inventario de repuestos.
- Disminución del tiempo y aumento de la fiabilidad de los diagnósticos.
- Identificación y sustitución de procedimientos ineficientes.

c) Mejora de la productividad.

- Mayor rapidez en la toma de decisiones.
- Reducción de paradas imprevistas.
- Aumento de la disponibilidad de los equipos.

d) Reducción de los gastos de capital.

- Ampliación de la vida útil de los equipos.
- Reducción de riesgos de averías irreparables.
- Mejora en la planificación de sustituciones de equipos.

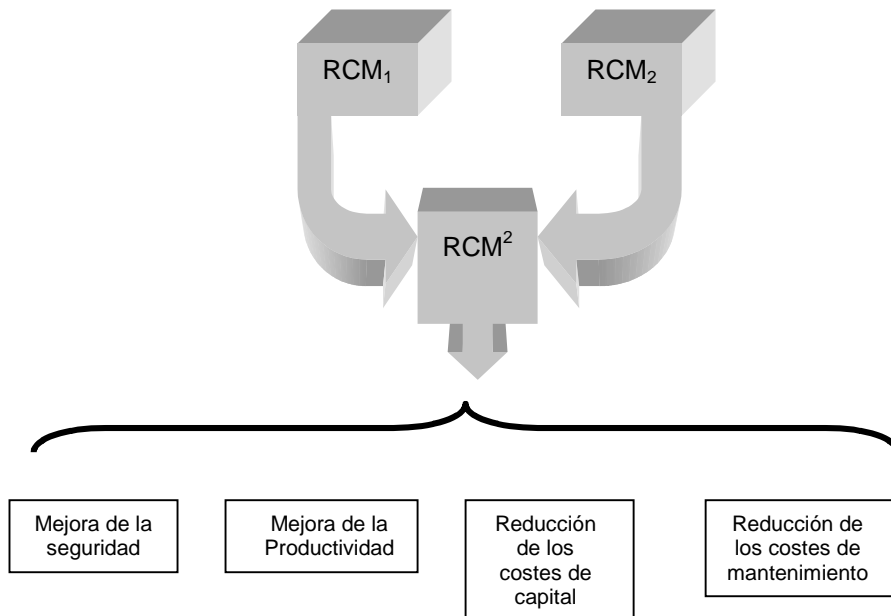


Figura 4.5.- RCM²: Composición y ventajas

Estas mejoras influyen directamente o indirectamente en el resto del sistema ferroviario, pues se disminuyen las paradas y retrasos de los trenes, aumentando consigo la eficiencia horaria y el confort del pasajero, así como se disminuyen todos los costes indirectos ocasionados, en gran medida, por estas mejoras, como es la imagen de la empresa. Esto se ve reflejado en un estudio llevado a cabo por el Ministerio Británico, publicado en julio de 1991 en la revista *Condition Monitoring and Diagnostic Technology*, donde se llegó a la conclusión de que un aumento del 5% de la disponibilidad de los equipos implicaba un aumento de la rentabilidad global de la empresa del 30%.

En el siguiente capítulo se describirá el RCM² diseñado, desarrollado e implantado en la empresa Balfour Beatty Rail [1] por las Universidades de Sheffield (Inglaterra) [71] y Castilla-La Mancha (España) [73]. Dicho RCM² se llevó a cabo para desvíos ferroviarios, donde se desarrollaron numerosos experimentos que sirvieron de referencia para desarrollar los modelos para detectar los fallos.

Referencias

- [1] Aduvire, O., 1994. *Relación entre Mantenimiento y Vida Útil de Maquinaria en Minería*, Mantenimiento, num. 72.
- [2] Alhamann, H., 1987, *Beneficios del Ciclo de Vida Útil. Un Nuevo Concepto de Mantenimiento*, Mantenimiento, num. 20.
- [3] Alfonso, A.F., 1991. *El Mantenimiento Predictivo en la Industria*, Mantenimiento, num. 47.
- [4] Balfour Beatty Rail. <http://www.balfourbeatty.com>.
- [5] Barlow, R.E. and Proschan, F., 1975. *Statistical Theory of Reliability and Life Testing*, Holt, Reinhart & Winston, Inc., New York.
- [6] Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J., 1981. *Systems Engineering and Analysis*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [7] Blanchard, B.S., 1986. *Logistics Engineering and Management*, 3ª Edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- [8] Blas, P., 1993. *Analizadores Multicanales: Análisis Orbital para Diagnóstico de Problemas de Vibración en Turbomaquinaria*, Mantenimiento, num. 66.
- [9] Bloch, H.P., and Geitner, F.K., 1990. *Practical Machinery Management for Process Plants*, Vol. 1-4, Gulf Publishing Company, Houston, Texas (EEUU).
- [10] Bolaños, F., 1987. *Causas Comunes de Vibración por mal Funcionamiento de Equipo Rotativo. Aplicación al Caso de Motobombas*. Automática e Instrumentación.
- [11] British Standard 5760, *Reliability of Systems, Equipment and Components: Part 5: Guide to Failures Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)*, 1991.
- [12] Butler, A.W., 1988. *The Evolution of Locomotive and Rolling Stock Maintenance Schedules*, ImechE Proceedings – Part D: Journal of Transport Engineering, vol. 20, pp. 33-43.
- [13] Cámara, F., 1996. *Termografía Infrarroja*, Mantenimiento, num. 94.
- [14] Clemente, C., 2001. *Detección de Fisuras en Ejes Mediante Corrientes Inducidas*, Mantenimiento, num. 145.
- [15] Collacot, R.A., 1979. *Vibration Monitoring and Diagnosis*. George Goowin.
- [16] Fararooy, S. and Allan, J., 1995. *Condition-Based Maintenance of Railway Signalling Equipment, Electric Railway in a United Europe*. Railink'95, IEE Conf. Pub. 405, pp. 33-37.
- [17] Fararooy, S., Allan, J., Abed, S.K. and Lehasad-Khan, N., 1996. *Condition Monitoring of Railway Equipment: Experiences from Case Studies*, The 9th International Congress on Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management: COMADEM'96, Sheffield, Rail Sessions Supplementary Proceedings.

- [18] Furh, P.L., Huston, D.R., Ambrose, T.P. and Mowat, E.F., 1994. *Internet Observatory: Remote Monitoring of Instrumented Civil Structures Using the Information Superhighway*, Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing Ltd, Bristol (UK), vol. 4, num. 1, pp. 14-19.
- [19] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Wear Assessment Employing Remote Condition Monitoring: A Case Study*. "Wear", nº 255, 2003, pp. 1209-1220.
- [20] García Márquez, F.P., Schmid, F. and Conde, J., 2003. *A Reliability Centered Approach to Remote Condition Monitoring. A Railway Points Case Study*, Reliability Engineering and System Safety. Vol. 80, num. 1, pp. 33-40.
- [21] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad y Monitorización Remota Basada en la Condición, RCM²: Un caso de Estudio*, "Ingeniería y Gestión de Mantenimiento", nº 26 Noviembre/Diciembre, 2002, pp. 35-41.
- [22] García, F. y Rajadell, M., 1992. *Sistemas Expertos para el Diagnóstico de Averías de Motores Diesel*, Anales de Ingeniería Mecánica.
- [23] García, J.M. y Amenazaga, M., 1993. *El Mantenimiento Preventivo y la Medida de su Eficiencia*, Mantenimiento, num. 54.
- [24] Heard, B.D., 1990. *Basic Principle of Signalling Practice on British Rail*, Proc. Inst. Railway Signal Engineers, pp. 61-74.
- [25] Hopfield, J.J. and Tank D.W., 1985. *Neural Computation of Decisions in Optimization Problems*, Biological Cybernetics, vol. 52, pp. 141-152.
- [26] Hult, S.J. and Uhlmann, J.K., 1995. *A General Method of Approximating Nonlinear Transformations of Probability Distributions*, Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- [27] Huston, D.R., Fuhr, P.L., Ambrose, T.P. and Barker, D.A., 1994. *Intelligent Civil Structures – Activities in Vermont*. Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing Ltd, Bristol (UK), vol. 3, num. 2, pp. 129-139.
- [28] International Society of Automotive Engineers, 1999. *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes JA1011*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE Publications.
- [29] Jardine, A.K.S., 1973. *Maintenance, Replacement and Reliability*, A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, Inc., New York, EEUU.
- [30] Julier S.J., Uhlmann, J.K. and Durrant-Whyte, H.F., 1995. *A New Approach for Filtering Nonlinear Systems*, *Proceedings of the 1995 American Control Conference*, Seattle, Washington, pp. 1628-1623.
- [31] Knezevic, J., 1987. *Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics*, Reliability Engineering, vol. 19, num. 1, Elsevier Applied Science.

- [32] Knezevic, J., 1987. *Requires Reliability Level as the Optimization Criterion*, Maintenance Management International, Elsevier, vol. 6, num. 4, pp. 249-256.
- [33] Knezevic, J., 1990. *Reliability and Maintenance: Fundamentals*, Lecture Notes, School of Engineering, University of Exeter, England.
- [34] Knezevic, J., 1993. *Reliability, Maintainability and Supportability Engineering: A Probabilistic Approach*, McGraw Hill, Londres, England.
- [35] Knezevic, J., 1995. *Effective Analysis of Existing Maintainability Data*, Journal of Communications in Reliability, Maintainability and Supportability, vol. 2, num. 1, pp.18-22.
- [36] Knezevic, J., 1996. *Mantenibilidad*, Isdefe Ingeniería de Sistema, Madrid.
- [37] Knezevic, J., 1996. *Mantenimiento*, Isdefe Ingeniería de Sistema, Madrid.
- [38] Lomba, A., 1989. *Sentido y Alcance del Mantenimiento Basado en la Condición*. Mantenimiento, num. 031.
- [39] Maintenance Steering Group - 3 Task Force, 1993. *Maintenance Program Development Document MSG-3*. Washington, D.C., Air Transport Association (ATA) of America.
- [40] Matthews, J.R. and Hay, D.R., 1983. *Acoustic Emission Evaluation*. W.J. McGonnagie, Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp. 1-14.
- [41] Maxwell, J.H., 1980. *Vibration Analysis Pinpoints Coupling Problems*, Hydrocarbon Processing.
- [42] Maxwell, J.H., 1981. *Diagnosing Induction Motor Vibration*. Hydrocarbon Processing.
- [43] Middleton, A., 1977. *Machinery Noise*. Oxford University Press.
- [44] Military Standard 1629A, *Procedures for Performing a Failure Mode Effects & Criticality Analysis*, 1983.
- [45] Mobley, R.K., 1994. *The Horizons of Maintenance Management, Maintenance Handbook*, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, USA.
- [46] *Modular System for Reliability and Maintainability Management in European Rail Transport*. <http://remain.iitb.fhg.de>
- [47] Moubray, J., 1997. *Reliability Centred Maintenance (RCM-II)*, Butterworth Heinemann, Oxford.
- [48] Nachlas, J.A., 1995. *Fiabilidad*, Isdefe Ingeniería de Sistema, Madrid.
- [49] Naval, E., 1997. *Técnicas Para el Seguimiento de la Condición a Partir de Resultados END*, Mantenimiento, num. 110.
- [50] Newell, G.E., 1999. *Oil Analysis Cost-Effective Machine Condition Monitoring Technique*, *Industrial Lubrication & Tribology*, vol. 51, num. 3, pp. 119-124.
- [51] Nowlan, F.S. and Heap, H., 1978. *Reliability-Centered Maintenance*, Springfield, Virginia. National Technical Information Service, US Department of Commerce.

- [52] Payri, F., Macian, V. y Espinoza, H., 1987. *Método rápido de Predicción de Averías de Motores Diesel Mediante Análisis de Aceite*, Anales de Ingeniería Mecánica.
- [53] Peña, D., 2001. *Fundamentos de Estadística*, Ciencias Sociales, Alianza Editorial.
- [54] Price, C.J., Pagh, D.R., Wilson, M.S. and Snooke, N., 1995. *The Flame System: Automating Electrical Failure Mode & Effects Analysis (FMEA)*, Proc. Reliability and Maintainability Symposium, pp. 90-95.
- [55] Ramón, F., 2001. *Estudio de la Severidad de Vibración en Máquinas Alternativas Bajo Recomendación, ISO 10816-6*, Mantenimiento, num. 149.
- [56] Rayo, J.P. y Aranjujo, R., 2001. *La Importancia del CBM (Mantenimiento Basado en la Condición) en Plantas de Cogeneración*. Mantenimiento, num. 145.
- [57] Rayo, J.P., 1991. *El Espectro del Spike Energy (Gse). Nueva Técnica en la Detección de Fallos en Rozamientos*, Mantenimiento, num. 47.
- [58] Rayo, J.P., 1992. *La utilización del "Spiker Energy" (TM), en el análisis de fallos y monitorizado de condición de maquinaria*. Mantenimiento, num. 60.
- [59] *Reliability Centred Maintenance Approach for Infrastructure and Logistics of Railway Operation*. www.datsi.fi.upm.es/~rail
- [60] RCM Implementation Team, Royal Navy, *NES 45 Naval Engineering Standard 45. Requirement for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships. Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels*. Foxhill, Bath, United Kingdom, UK Ministry of Defense Publications.
- [61] Rodríguez, A., Rodríguez, R. y Carbia J., 2000. *Aumento de la Seguridad en Máquinas Rotativas Mediante el Estudio de la Severidad de Vibración*, Mantenimiento, num. 137.
- [62] Salvi, F., 1994. *Inspección y Control de un Sistema Completo de Pintado*, Mantenimiento, num. 71.
- [63] Santana, E., 1990. *Mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo*, Mantenimiento, num. 42.
- [64] Schultes, G., 1995. *Trends in the Maintenance of Modern Tracked Vehicles*, *European Railway Review*, pp. 67-76.
- [65] Shell Lubricantes, 1991. *Mantenimiento Predictivo Mediante el Análisis de las Partículas Contenidas en el Lubricante en Uso*, Mantenimiento, num. 49.
- [66] Shimonae, T., Kawakami, T., Miki, H., Matsuda, O. and Takeuchi, H., 1991. *Development of a Monitoring System for Electric Point Machines*, IRSE Aspect Int. Conf., pp. 395-401.
- [67] Simms, J.M., and Smith, R.A., 1996. *Strategic Options in Railway Maintenance Management: Maintenance Philosophies and New Technologies*, The 9th International Congress on Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management: COMADEM'96, Sheffield, Rail Sessions Supplementary Proceedings.
- [68] Srikrishna S., Yadava G.S. and Rao P.N., 1996. *Reliability-Centred Maintenance Applied to Power Plant Auxiliaries*, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 2, num. 1, pp. 3-14.

- [69] Stott, P.F., 1987. *Automatic open level crossing a review of safety*, Her Majesty's Stationery Office, London (UK).
- [70] The Engineering and Physical Sciences Research Council. <http://www.epsrc.ac.uk>
- [71] The University of Sheffield. <http://www.shef.ac.uk>
- [72] Thorstensen, T.A. and Rasmussen, M., 1999. *A Cost Model for Condition Based Overhaul/Replacement*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 5, num. 2, pp. 102-114.
- [73] Universidad de Castilla-La Mancha. <http://www.uclm.es>.
- [74] US Naval Air Systems Command, NAVAIR 00-25-403: *Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Main-tenance Process*. Philadelphia, Pennsylvania. US Department of Defense Publications.
- [75] US Department of Defence, 1986. *Reliability-Centred Maintenance Requirement for Naval Aircraft, Weapon Systems and Suport Equipment*, DOD.
- [76] Valverde, A. y Gómez de León, F.C., 1993, *Sistema de Análisis y Simulación de Señales de Vibración Mediante Computador*. Anales de Ingeniería Mecánica.
- [77] Villar, F., 1997. *Mantenimiento Predictivo en Transformadores de Medida y Experiencia en Detección de Descargas Parciales por Ultrasonidos*, Mantenimiento, num. 102.

Anexo I. Vector de camino mínimo y de corte

Un vector de camino es un vector de estado de los componentes de x para el cual $\phi(x) = 1$. El conjunto de camino se denota por $P(x)$, en el que se cumple que $P(x) = \{i \mid x_i = 1\}$.

Un vector de camino mínimo es un vector de camino para el cual $y < x$ implica que $\phi(y) = 0$. El correspondiente conjunto de camino $P(x)$ se designa como un conjunto de camino mínimo. Un vector de camino mínimo es aquél cuyo conjunto de camino no tiene ningún subconjunto que sea un conjunto del camino, es decir, el conjunto más pequeño de componentes cuyo funcionamiento hace que el sistema funcione.

Si $\rho_j(x)$ es la función de estado para el vector de camino mínimo j -ésimo, y considerando que cada componente de un camino mínimo tiene que funcionar para que el camino mínimo funcione, se ha de cumplir la relación dada en la ecuación (A1.1).

$$\rho_j(x) = \prod_{i \in P_j} x_i. \quad (A1.1)$$

Del mismo modo, hasta que un camino mínimo funcione para que el sistema lo haga, se ha de cumplir la ecuación (A1.2).

$$\phi(x) = \prod_j \rho_j(x) = \prod_j \prod_{i \in P_j} x_i. \quad (A1.2)$$

Un vector de corte es un vector x de estado de los componentes para el que $\phi(x) = 0$. El correspondiente conjunto de corte es $C(x) = \{i \mid x_i = 0\}$. Un vector de corte mínimo es un vector de corte x para el que $y > x$ implica que $\phi(y) = 1$. El conjunto mínimo de corte $C(x)$ será un conjunto de corte mínimo. Un vector de corte mínimo es aquel cuyo conjunto de corte no tiene un subconjunto que constituya un vector de corte, es decir, es el conjunto más pequeño de componentes cuyo fallo asegura el fallo del sistema.

Si $\kappa_k(x)$ es la función de estado k -ésimo vector de cortes mínimos, se ha de cumplir la relación dada por la ecuación (A1.3).

$$\kappa_k(x) = \prod_{i \in C_k} x_i. \quad (A1.3)$$

Como todos los cortes mínimos deben de funcionar para que el sistema funcione, se ha de cumplir la ecuación (A1.4).

$$\phi(x) = \prod_k \kappa_k(x) = \prod_k \prod_{i \in C_k} x_i. \quad (A1.4)$$

Anexo II. Terminología

Nomenclatura en Español	Nomenclatura en Inglés	Abreviatura
Recursos de mantenimiento	Maintenance Resources	MR
Análisis de los recursos del mantenimiento	Maintenance Resources Analysis	MRA
Tiempo hasta el fallo	Time To Failure	TTF
Tiempo para el mantenimiento	Time To Maintenance	TTM
Tiempo medio para el mantenimiento	Mean Time To Maintenance	MTTM
Tiempo medio hasta el fallo	Mean Time To Failure	MTTF
Tiempo medio entre sustituciones no programadas	Mean Time Between Unscheduled Removals	MTBUR
Tiempo medio entre alertas de mantenimiento	Mean Time Between Maintenance Alerts	MTBMA
Política de mantenimiento basada en la producción del fallo	Failure-Based Maintenance	FBM
Política de mantenimiento basada en la vida del sistema	Life-Based Maintenance	LBM
Política de mantenimiento basada en la inspección	Inspection-Based Maintenance	IBM
Política de mantenimiento basada en el examen	Examination-Based Maintenance	EBM
Política de mantenimiento basada en la oportunidad	Opportunity-Based Maintenance	OBM
Tarea de mantenimiento correctivo	Corrective Tasks	CRT
Tarea de mantenimiento preventivo	Preventive Task	PRT
Tarea de mantenimiento condicional	Conditional Maintenance Task	COT
Indicador de la condición	Relevant Condition Indicator	RCI
Estimador de la condición	Relevant Condition Predictor	RCP
Estimador de mantenimiento	Relevant Maintenance Predictor	RMP
Duración de la tarea de apoyo		DST
Tiempo empleado en la tarea de mantenimiento	Duration of Elapsed Maintenance Time	DMT
Duración de la tarea de mantenimiento	Duration of Maintenance Task	DMT
Duración esperada del tiempo de mantenimiento		MDMT
Tiempo de retraso logístico	Logistic Delay Time	LDT
Tiempo de retraso administrativo	Administration Delay Time	ADT
Tiempo para efectuar el mantenimiento		TP
Fiabilidad	Fiabilidad	R

Fiabilidad exigida	Reliability Required	R_r
Frecuencia de las inspecciones	Time to inspection	TI
Función de mantenibilidad		$M(t)$
Función de densidad de probabilidad de DMT		$m(t)$
Tasa de ingresos por hora	Hourly Rate	HR
Coeficiente de Utilización		CU
Coste por hora del personal	Hourly Cost of Personnel	HCP
Coste de oportunidad o coste de ingresos perdidos	Cost of Lost Revenue	CLR
Coste directo asociado a cada tarea de mantenimiento	Cost of Maintenance Task	CMT
Coste de los recursos de mantenimiento	Cost of Maintenance Resources	CMR
Coste total directo de mantenimiento	Cost Failure Maintenance	CFM
Coste de los repuestos		C_s
Coste del material		C_m
Coste del personal		C_p
Coste de las herramientas y el equipo		C_{te}
Coste de las instalaciones		C_f
Coste de los datos técnicos		C_d
Estrategia de sustitución óptima	Optimal Replacement Strategy	ORS
Número de fallos	Number of Failures	NF
Número de tareas de mantenimiento	Number of Maintenance Task	NMT
Número de elementos críticos	Number of Critic Individual	NCI
Número de grupos	Number of Group	NG
Número de elementos individuales	Number of Individual	NI
Media	Mean	M
Esperanza	Expectancy	E
Desviación estándar	Standar Deviation	SD

5 Modelo de Detección de Fallos en RCM² Empleando el Filtro de Kalman Aplicado a los Desvíos Ferroviarios

En el presente capítulo se describe el hardware empleado en los experimentos para la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos, así como el accionamiento de agujas.

Todos estos datos son tratados en una unidad central de procesamiento de datos, que por lo general será un ordenador, con el fin de informar al operario acerca del estado y/o la condición del sistema. De este modo el operario puede tomar las medidas oportunas, o incluso, el propio sistema es el que puede tomar las decisiones de forma automática.

Para ello es preciso describir primeramente las posibles causas que dan origen al fallo, y desarrollar posteriormente un modelo que pueda identificar dicho fallo, tanto en el sentido normal del movimiento del accionamiento de agujas, como en el inverso.

El modelo presentado en esta capítulo consta de tres criterios, siendo estos los siguientes:

- Anomalías en la forma de la curva.
- Posición del máximo de las curvas Fuerza [N] vs. Tiempo [s].
- Relación entre áreas de la curva separadas por el máximo.

En dicho modelo se ha empleado el filtro de Kalman con el fin de poder mejorar su eficiencia. El capítulo concluye con un análisis de las mejoras obtenidas mediante el empleo del filtro de Kalman en el número de fallos detectados, así como la mejora conseguida en los parámetros considerados en los distintos criterios que constituyen el modelo.

Índice de contenidos

5	Modelo de Detección de Fallos en RCM² Empleando el Filtro de Kalman Aplicado a los Desvíos Ferroviarios.....	167
5.1	Introducción	174
5.2	Descripción del hardware empleado en los experimentos	175
5.2.1	Recogida y transmisión de datos	175
5.2.2	Descripción del accionamiento de agujas.....	177
5.3	Modelo.....	182
5.3.1	Primer criterio: Anomalías en la forma de la curva	186
5.3.2	Segundo Criterio: Posición del máximo de las curvas Fuerza (N) - Tiempo (s) ...	187
5.3.3	Relación entre áreas de la curva separadas por el máximo.....	188
5.4	Filtro de Kalman	191
5.4.1	Introducción	191
5.4.2	Aplicación del Filtro de Kalman.....	196
5.4.3	Resultados de los Experimentos.....	199
5.4.4	Resultados obtenidos empleando el modelo con y sin Filtro de Kalman	204
5.5	Modelos de componentes no observables	206
5.5.1	Estimación del vector de estado	207
5.5.2	Estimación de los Hiper-Parámetros.....	208
5.5.3	Modelo empleado.....	209
5.5.4	Resultados experimentales	211
	Referencias.....	215
	Anexo I. Nomenclatura	218
	Anexo II. Sensores empleados en los experimentos.....	220
	A2.1 Sensor de aguja.....	220
	A2.2 Sensor de punta de aguja	221
	A2.3 Sensor de fuerza del carril.....	222
	A2.4 Sensor de temperatura del carril	223
	A2.5 Sensor de entrecalle.....	224
	Anexo III. Análisis de fallos	225
	A3.1 Vibration.....	225
	A3.2 P-Way Working Alone	226
	A3.3 Track Geometry	227
	A3.4 Condition of Track.....	228
	A3.5 Environment.....	229
	A3.6 HW Drive	230
	A3.7 Motor.....	231
	A3.8 Springs.....	232

A3.9 Track Geometry	233
A3.10 HW Lock.....	234
A3.11 Snubbing	235
A3.12 Supplementary Detector	236
A3.13 Cut Out Contacts.....	237
A3.14 HW Detection	238
A3.15 Backdrive	239
A3.16 Rail Clamp Locks	240
A3.17 Pump Unit	241
A3.18 Rail Clamp Locks	242
A3.19 Mechanics	243
A3.20 UN-Even Traffic Patterns	244
A3.21 S&T Standards.....	245
A3.22 M63 Point Failures	246
A3.23 M63 Drive.....	247
A3.24 Drive External to Machine	248
A3.25 Drive Internal to Machine	249
A3.26 M63 Lock.....	250
A3.27 M63 Detection	251
Anexo IV. Clasificación de Fallos en los en los Desvíos Ferroviarios	252
Anexo V. Breve biografía de Rudolph Emil Kalman	254
Anexo VI. Filtro de Kalman y Algoritmo de Suavizado Fijo.....	255

Índice de figuras

Figura 5.1.- Estructura básica de RCM ² desarrollado en BBR	175
Figura 5.2.- Disposición de sensores en el desvío ferroviario	178
Figura 5.3.- Motor de accionamiento de agujas.....	178
Figura 5.4.- Esquema de montaje del motor del accionamiento de aguja.....	179
Figura 5.5.- Vista en planta del motor de accionamiento de agujas	180
Figura 5.6.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas, con una caja de cambios de 189:1 y puente rectificador de 110 V y 50 Hz	180
Figura 5.7.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas de 110 V DC, con una caja de cambios de 189:1	181
Figura 5.8.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas de 24 V DC, con una caja de cambios de 360:1	181
Figura 5.9.- Variables y fallos en los accionamientos de aguja	183
Figura 5.10.- Fuerzas del motor del accionamiento de agujas en el sentido normal	184
Figura 5.11.- Fuerzas del motor del accionamiento de agujas en el sentido inverso.....	184
Figura 5.12.- Diferencias entre curvas fuerzas (N)-tiempo (s) que no representan fallos del mecanismo de accionamiento de agujas.	185
Figura 5.13.- Parámetro a correspondiente al primer criterio	186
Figura 5.14.- Parámetros Δt , t_{max}^i y t_{max}^j correspondientes al segundo criterio	188
Figura 5.15.- Parámetros t_{max}^i , T^j correspondientes al tercer criterio	189
Figura 5.16.- Diagrama de Flujo del Modelo.....	190
Figura 5.17.- Curvas teórica y real “corriente (A) versus tiempo (s)” de un motor eléctrico correspondiente al mecanismo del cambio de agujas	191
Figura 5.18.- Filtro de Kalman aplicado a la medida de la corriente [A] del motor de accionamiento de agujas versus tiempo [s], considerando el factor Q variable. - - Señal filtrada, — señal real.	198
Figura 5.19.- Filtro de Kalman aplicado a la medida de la corriente [A] del motor de accionamiento de agujas versus tiempo [s], considerando el factor R variable. - - Señal filtrada, — señal real.	199
Figura 5.20.- Identificación de las operaciones del mecanismo de accionamiento de agujas en la curva de la corriente de su motor (Fuente: referencia [34])	200
Figura 5.21.- División en secciones de la curva de la corriente [A] versus tiempo [s] del motor de un mecanismo de accionamiento de agujas.	201
Figura 5.22.- Desviaciones de 0.05 y 0.1 A en el intervalo {1.169, 2.063} s de la curva teórica mostrada en la Figura 5.17.	202
Figura 5.23.- Diferencias entre la señal de referencia y la curva con la perturbación (ver Figura 5.22) [13]	203

Figura 5.24.- Diferencia en valor absoluto entre la señal que está siendo analizada y la señal de referencia empleando el FK.....	204
Figura 5.25.- Experimentos de los parámetros considerados en el modelo	206
Figura 5.27.- Dos ejemplos de predicciones basadas en el modelo (5.46) con diferentes orígenes de predicción. En la curva superior no existe ningún fallo, en la curva inferior sí. Los orígenes de predicción en ambos casos se han marcado con una línea vertical [31].	212
Figura 5.28.- Estimación recursiva de ρ (asterísco) y banda de confianza al 95 % (continua) para una curva sin fallo (superior) y otra con fallo (inferior) [31].	213
Figura A2.1.- Sensor de aguja.....	220
Figura A2.2.- Sensor de punta de aguja.....	221
Figura A2.3.- Sensor de fuerza del carril	222
Figura A2.4.- Sensor de temperatura del carril.	223
Figura A2.5.- Sensor de entrecalle	224
Figura A3.1.- Vibration	225
Figura A3.2.- P-Way Working Alone.....	226
Figura A3.3.- Track Geometry	227
Figura A3.4.- Condition of Track.....	228
Figura A3.5.- Environment.....	229
Figura A3.6.- HW Drive.....	230
Figura A3.7.- Motor.....	231
Figura A3.8.- Springs	232
Figura A3.9.- Track Geometry	233
Figura A3.10.- HW Lock	234
Figura A3.11.- Snubbing.....	235
Figura A3.12.- Supplementary Detector	236
Figura A3.13.- Cut Out Contacts	237
Figura A3.14.- HW Detection.....	238
Figura A3.15.- Backdrive	239
Figura A3.16.- Rail Clamp Locks.....	240
Figura A3.17.- Pump Unit	241
Figura A3.18.- Rail Clamp Locks Mechanism	242
Figura A3.19.- Mechanics.....	243
Figura A3.20.- UN-Even Traffic Patterns.....	244
Figura A3.21.- S&T Standards.....	245
Figura A3.22.- M63 Point Failures.....	246
Figura A3.23.- M63 Drive.....	247
Figura A3.24.- Drive External to Machine.....	248
Figura A3.25.- Drive Internal to Machine	249
Figura A3.26.- M63 Lock	250

Figura A3.27.- M63 Detection 251

Figura A5.1.- Rudolph Emil Kalman..... 254

Índice de tablas

Tabla 5.1.- Fallos detectados en la señal sin filtrar, m , y filtrada, f , en 100 simulaciones, donde \bar{e} y s^2 son la media y la varianza respectivamente. Las variaciones en la curva son 0.05 A. y 0.1 A.....	203
Tabla A4.1.- Clasificación de Fallos en los en los Desvíos Ferroviarios [16].....	253

5.1 Introducción

Como se ha comentado en los capítulos anteriores, en los sistemas de transportes en general, y en particular el transporte férreo de alta velocidad, la seguridad juega un papel primordial. La fiabilidad es el factor, tras la seguridad, donde se centran la mayoría de los esfuerzos en el desarrollo y mantenimiento de los elementos relacionados con este medio de transporte [11].

Por fiabilidad se entiende la probabilidad de que un producto realice sin fallo una función concreta bajo unas condiciones y en un periodo de tiempo dado. La fiabilidad puede ser expresada en términos de probabilidad de un funcionamiento correcto, tiempo medio entre fallos, ciclos medios de funcionamiento entre fallos o disponibilidad, entendiendo ésta como la medida del estado del producto en un momento dado cuando es requerido para su funcionamiento. Uno de los parámetros que contribuye a la disponibilidad del producto es la mantenibilidad. En el mantenimiento se consideran los efectos de los fallos del producto y la forma de minimizarlos. Por el contrario, la fiabilidad considera las causas de fallos del producto y su eliminación. Dentro de las distintas técnicas de mantenimiento, en la presente tesis se ha trabajado en RCM², como se mencionaba en el capítulo anterior.

El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability Centred Maintenance, RCM₁), como se ha mencionado en el capítulo anterior, es una metodología de análisis objetivo, sistemático y documentado, el cual se centra en el mantenimiento preventivo o predictivo de los elementos críticos del producto, así como en un mantenimiento correctivo en los elementos no críticos de dicho producto [30].

La aplicación de las nuevas tecnologías referentes a los distintos sensores, medios de control, transmisión de información, etc., dan origen a la monitorización remota basada en la condición (Remote Condition Monitoring, RCM₂). Por RCM₂ se entiende la medición de una variable física representativa de la condición de la máquina, y la comparación de esta variable con valores representativos del estado del equipo. En el concepto RCM₂ se considera también la adquisición, preprocesamiento y almacenamiento de datos [7].

RCM² es el resultado de desarrollar conjuntamente los dos conceptos RCM_i [17] y [9]. La técnica de mantenimiento RCM² expuesta en el capítulo anterior ha sido desarrollada e implantada con éxito en un proyecto de investigación llevado a cabo por los grupo de investigación Advanced Railway Research Centred (University of Sheffield, Inglaterra) [35], la Universidad de Castilla-La Mancha y el área de mantenimiento de infraestructuras ferroviarias de la compañía inglesa Balfour Beatty Rail (BBR) [1] durante el año 2000.

En el presente capítulo se describe el hardware utilizado en los experimentos, así como los algoritmos desarrollados necesarios para poder detectar e identificar los fallos que se dan en el accionamiento de agujas.

5.2 Descripción del hardware empleado en los experimentos

5.2.1 Recogida y transmisión de datos

En la Figura 5.1 se describe de forma esquemática el sistema desarrollado en el proyecto mencionado en el párrafo anterior para poder monitorizar los parámetros que servirán para establecer la condición del sistema.

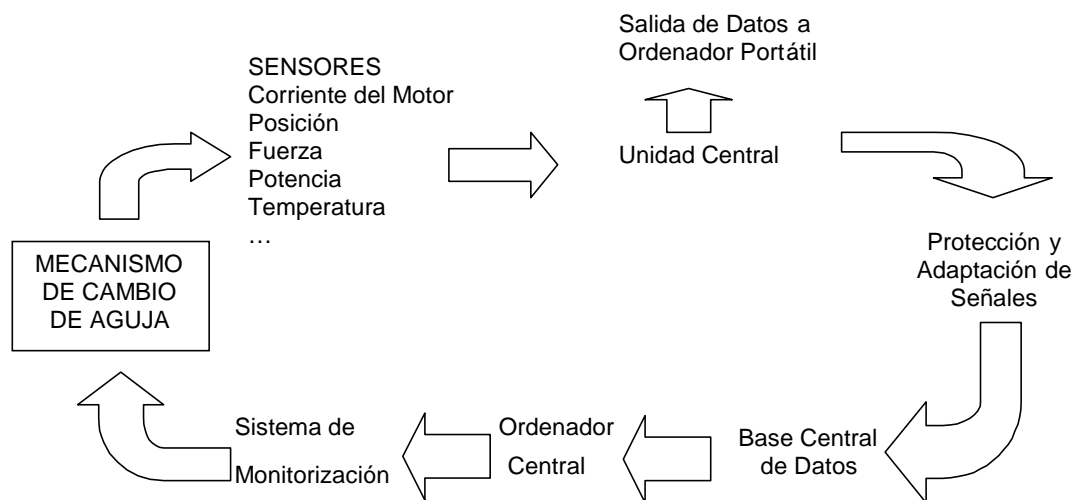


Figura 5.1.- Estructura básica de RCM² desarrollado en BBR

A continuación se describe el hardware más relevante utilizado en el proyecto.

La *corriente del motor* se mide usando un transformador de corriente situado dentro de la caja del mecanismo del accionamiento de aguja. Los transformadores de corriente toman la señal en el cable de retorno del motor. La fuerza se toma en la barra de accionamiento mediante un sensor CDS.

La tensión para los distintos componentes de instrumentación y control es de 110 v, cuya fuente de alimentación está situada en un habitáculo adyacente, empleando para ello un transformador BR 924A. La fuente de alimentación soporta oscilaciones de la tensión de red y averías según IEC 1000-4 (IEC 801). Los impulsos VDE 0160 se regulan en la salida y no se transmiten a la unidad de consumo, siendo la protección de toda la gama de cargas de clase 2. La fuente de alimentación se protege electrónicamente en la salida contra sobrecargas (OVP) y

contra el cortocircuito permanente. La alimentación de red y la salida disponen de un estricto seccionamiento galvánico.

El cableado principal se conduce por tuberías flexibles estándares de color naranja, para poder ser diferenciadas con claridad de las restantes. El cable de dos hilos trenzado con diámetro de 8 mm se emplea para transmitir señales de proceso de alternancia de frecuencias (Frequency Shift Keying, FSK), pudiéndose con ello superar distancias de 10 km, y admitiéndose la incorporación de una estructura de bus.

Los sensores se acoplan localmente a una caja de conexión cercana al mecanismo del accionamiento de agujas, conocida como caja de captación. Dicha caja contiene elementos no activos pero con protectores de señal para el sensor de posición. La caja permite la conexión de un ordenador portátil con el fin de que éste pueda leer y almacenar los datos correspondientes a la señal que estaba siendo tratada en caja. En el armario de captación de datos se localiza el bastidor para los distintos circuitos, como por ejemplo la tarjeta del procesador, las de corriente, las DMS y las de temperatura. El rack se equipa con una tarjeta procesadora y con capacidad hasta 16 tarjetas de E/S. A continuación se describen las tarjetas más importantes que contiene el armario de captación:

- La tarjeta del procesador y de comunicación, conocida como tarjeta de cabecera o KGB, que establece el procesamiento de datos de las distintas tarjetas E/S. El KGB también permite la comunicación con la caja de conexión central y la función del interfase de servicio.
- La tarjeta de corriente, la cual tiene cuatro canales de entrada con una gama de media desde 0 mA hasta 25 mA, permite entradas digitales.
- La tarjeta DMS, que posee 4 canales de entrada con una banda de medición de 0 a 25 mV, siendo la tensión de alimentación del puente de 10 V en corriente continua.
- La tarjeta de punta de corazón (HSP), la cual posee dos canales de entrada DMS con una banda de media de 0 mV a 25 mV. Además existen canales de corriente con una banda de media de 0 mA a 25.1 mA.

Existe una caja de conexión central que toma las señales de las restantes cajas de conexión de los distintos sensores, conteniendo las correspondientes protecciones y adaptadores de señales. La caja dispone de protección del tipo IP56 según la norma EN 60 529/10.91.

Se han empleado cables de fibra óptica para la red local de conexión. La caja de conexión central envía las señales a la base central de datos, donde se leen y son tratados por el ordenador. Los puntos de diferenciación pueden ser: MODEM, fuente de alimentación, tipo de protección o diversas variaciones de estas estructuras, con el fin de permitir la variación de la estructura de la electrónica de captación de datos.

La transmisión de los datos relativos a los distintos puntos de medición se registran en una zona de memoria RAM en la tarjeta del procesador. Estos datos se transmiten al ordenador central a través de una estructura de bus en serie con una conexión punto a punto en serie. La estructura de la transmisión de datos se diferencia tanto por el tipo del medio como también por la correspondiente longitud del segmento. La velocidad de transmisión en línea y en serie varía desde 4.800 baudios hasta 38.400 baudios. El protocolo empleado en la transmisión en serie es el Profibus estándar con el servicio FDL.

La puesta en servicio o el mantenimiento del sistema de diagnóstico de agujas permite la posibilidad, a través de un programa de terminal, de realizar el control de los sistemas sensores conectados o de la obtención de valores de corrección a través del interfase de servicio fijo incorporado de 38.400 baudios.

En los experimentos realizados todos los datos fueron recogidos y tratados en una plataforma hardware de la estación informática central. Para ello fue preciso desarrollar una serie de algoritmos con el fin de facilitar al operario la interpretación de los datos y por tanto la toma de decisiones. Esta fase ha sido desarrollada por el autor de la presente tesis, la cual es presentada en las siguientes secciones, mostrándose los resultados y conclusiones más relevantes acerca de los experimentos realizados.

5.2.2 Descripción del accionamiento de agujas

Los parámetros más destacados para poder llevar un correcto control del desvío ferroviario son:

- La posición de la aguja.
- Motor de aguja.
- Condiciones del espadín.
- Estado del corazón.
- Información ambientales.

Para ello se precisa llevar un control de, por ejemplo, las siguientes variables Figura 5.2:

- A. Datos referentes al motor izquierdo de la aguja (si lo hubiere).
- B. Datos referentes al motor derecho de la aguja (si lo hubiere).
- C. Depresión.
- D. Acoplamientos de la punta del corazón.
- E. Sujeción del corazón.
- F. Líneas características del corazón.
- G. Fuerza residual.
- H. Información diaria referente, por ejemplo. A las maniobras realizadas, acomplamiento de la punta del corazón/día, etc.

- I. Maniobras individuales.
- J. Zona de la aguja izquierda.
- K. Zona de la aguja derecha.
- L. Información ambiental, como por ejemplo, la temperatura, la humedad, etc.
- M. Medición de la fuerza longitudinal de la aguja.
- N. Medición de la fuerza longitudinal del puente.

Alguna de estas variables se podrían controlar mediante monitorización empleando los sensores dispuestos en el desvío como se indica, por ejemplo, en la Figura 5.2. En el Anexo II se muestran los más importantes empleados en el proyecto.

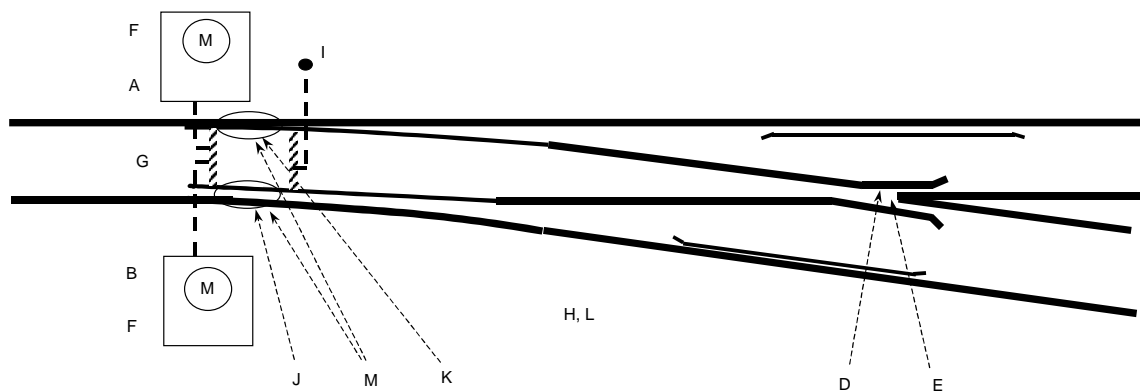


Figura 5.2.- Disposición de sensores en el desvío ferroviario

El motor de accionamiento de agujas empleado en los experimentos fue el M23A Mk11 (ver Figura 5.3), desarrollado por Signal Division, Westinghouse Brake & Signal Company (Australia) Limited. En la Figura 5.4 se muestra el esquema de montaje de dicho motor.

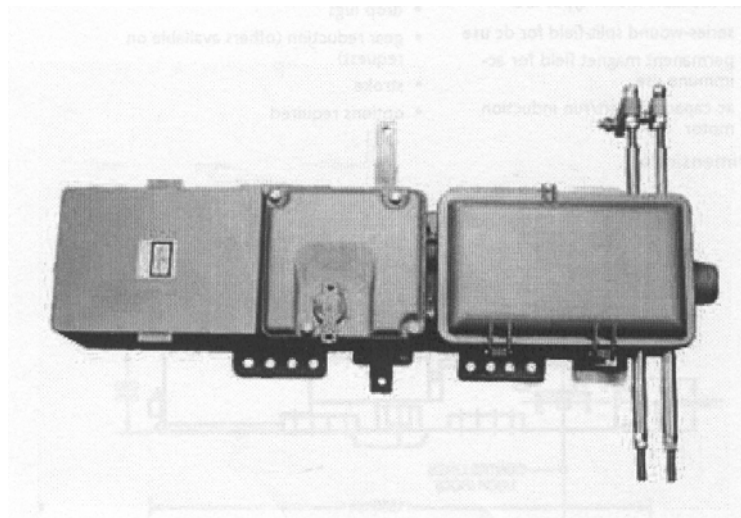


Figura 5.3.- Motor de accionamiento de agujas

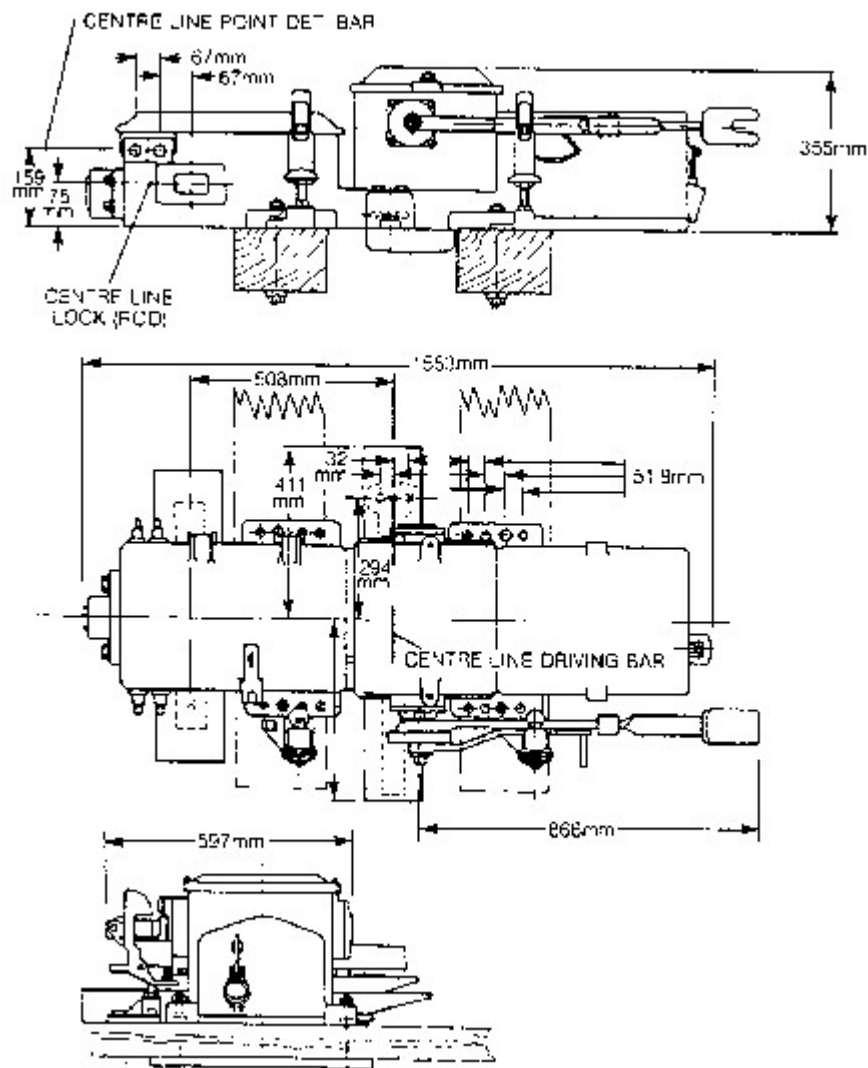


Figura 5.4.- Esquema de montaje del motor del accionamiento de aguja

El motor cumple las especificaciones BS581 y AAR. La tensión de trabajo del motor es de 110 V AC (25 o 50 Hz), 24 V y 110 V en DC. Las dimensiones del motor se muestran en la Figura 5.4. La caja de cambios tiene dos reducciones, una de 189:1 y otra de 360:1. La primera de 189:1 se usa normalmente con máquinas de alto voltaje, mientras que la reducción se emplea para máquinas de 24 V DC sin excesiva corriente eléctrica. Los contactores del motor son de 24 V ó 50 V AC, y 110 V AC a 25 ó 50 Hz. Los contactores inmunes a 1000 V RMS trabajan a tensiones de 24 ó 50 V DC. En la Figura 5.5 se representa en planta el motor de accionamiento de agujas.

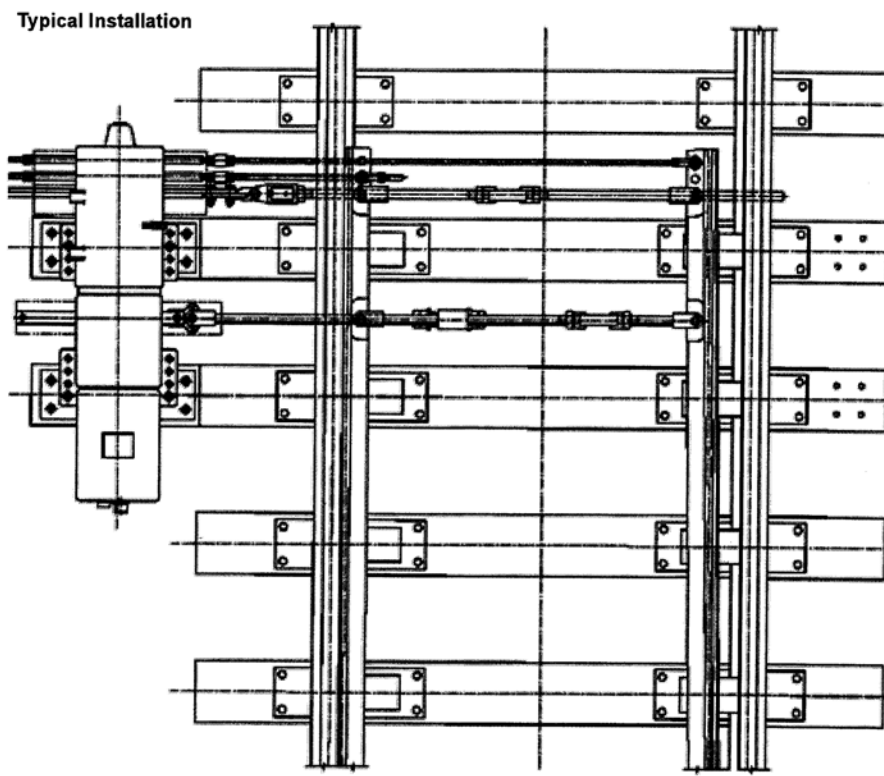


Figura 5.5.- Vista en planta del motor de accionamiento de agujas

En la Figura 5.6 se representa las curvas de fuerza vs. corriente y fuerza vs. tiempo del motor de accionamiento de agujas, con una caja de cambios de 189:1 y puente rectificador de 110 V y 50 Hz.

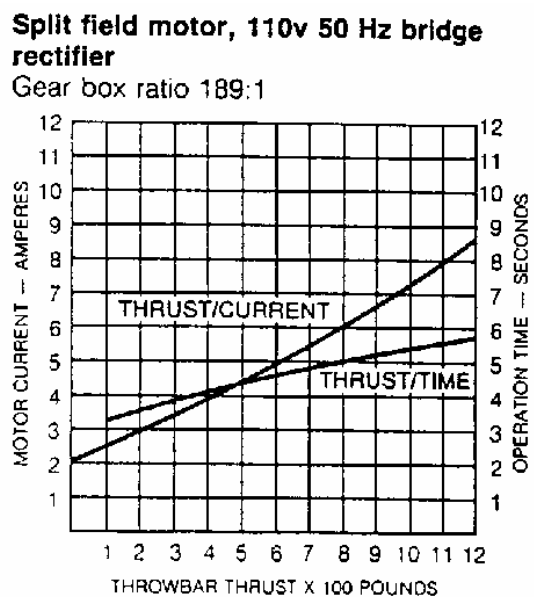


Figura 5.6.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas, con una caja de cambios de 189:1 y puente rectificador de 110 V y 50 Hz

En la Figura 5.7 se representa las curvas de fuerza vs. corriente y fuerza vs. tiempo del motor de accionamiento de agujas de 110 V DC, con una caja de cambios de 189:1.

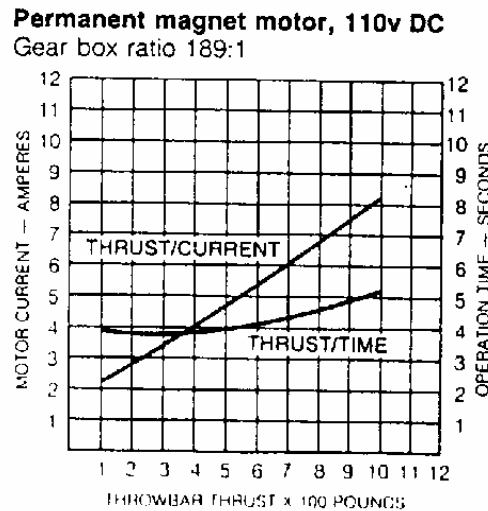


Figura 5.7.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas de 110 V DC, con una caja de cambios de 189:1

En la Figura 5.8 se representa las curvas de fuerza vs. corriente y fuerza vs. tiempo del motor de accionamiento de agujas de 24 V DC, con una caja de cambios de 360:1.

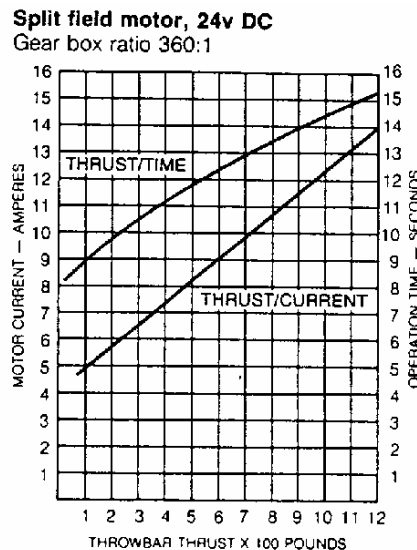


Figura 5.8.- Fuerza vs. Corriente y Fuerza vs. Tiempo del motor de accionamiento de agujas de 24 V DC, con una caja de cambios de 360:1

En el mantenimiento centrado en la Fiabilidad, RCM₁, normalmente, el estado de un sistema está siendo controlado mediante el análisis de una señal, relacionada directa o indirectamente con el sistema. Si la técnica que se está empleando para ello es la

monitorización remota basada en la condición, RCM₂, la señal que está siendo propósito de análisis y control será, por lo general, tratada en tiempo real mediante el empleo de algún algoritmo. Para ello, se deberá exigir al algoritmo que emplee unos tiempos de computación mínimos. Así pues, es aconsejable el empleo un modelo simple y efectivo, el cual requiera de unos tiempos de cálculo mínimos. En la siguiente sección se describe dicho modelo.

5.3 Modelo

El desvío ferroviario, y más concretamente el accionamiento de agujas, es un sistema bastante complejo en el que a priori es muy complejo detectar la causa, o las causas, que originaron el fallo. Para ello, lo primero que se llevó a cabo en el proyecto que está siendo descrito en este fue analizarlas, así como los posibles fallos que se pueden dar el accionamiento de agujas, trabajo realizado por la compañía BBR y que se muestra en el Anexo II.

A continuación se muestran la probabilidad del origen directo de los fallos dados en los accionamientos de aguja:

- Civil, 13 %:
 - Vibración, 43 %.
 - Movimiento del accionamiento, 9 %.
 - Geometría del trayecto, 4 %.
 - Estado del trayecto, 14 %.
- Condiciones medioambientales, 7 %.
- Maquinaria del accionamiento, 66 %:
 - HW de accionamiento, 33 %.
 - HW cerrojo, 33 %.
 - Barra de retorno, 17 %.
 - Detector suplementario, 1 %.
 - HW Detector, 17 %.
- Tráfico ferroviario, 1 %.
- Estándares S & T, 13 %.

Como se ha comentado en la sección anterior, los sistemas de accionamiento de agujas, tanto los empleados en infraestructuras de alta velocidad como en los convencionales, están sometidos a las distintas variaciones climáticas. Ello hará que una señal representativa del sistema tenga una forma distinta en función de, por ejemplo, la temperatura y la humedad relativa al medio ambiente, o a la propia del sistema (ver Figura 5.9). Así pues, un algoritmo para identificar y clasificar fallos a partir de la señal medida, que no tuviera en cuenta las condiciones climáticas, sería incapaz de distinguir entre la curva de una señal originada por un fallo bajo ciertas condiciones climáticas y la misma curva de la señal originada por un estado en que no se da el fallo, pero bajo otras condiciones climáticas. Del mismo modo, una curva

representativa de un estado sin fallos podría dar lugar a que representara a un estado con fallos, debido a diversas causas climáticas o temporales que hagan que se modifique su forma [12] y [18].

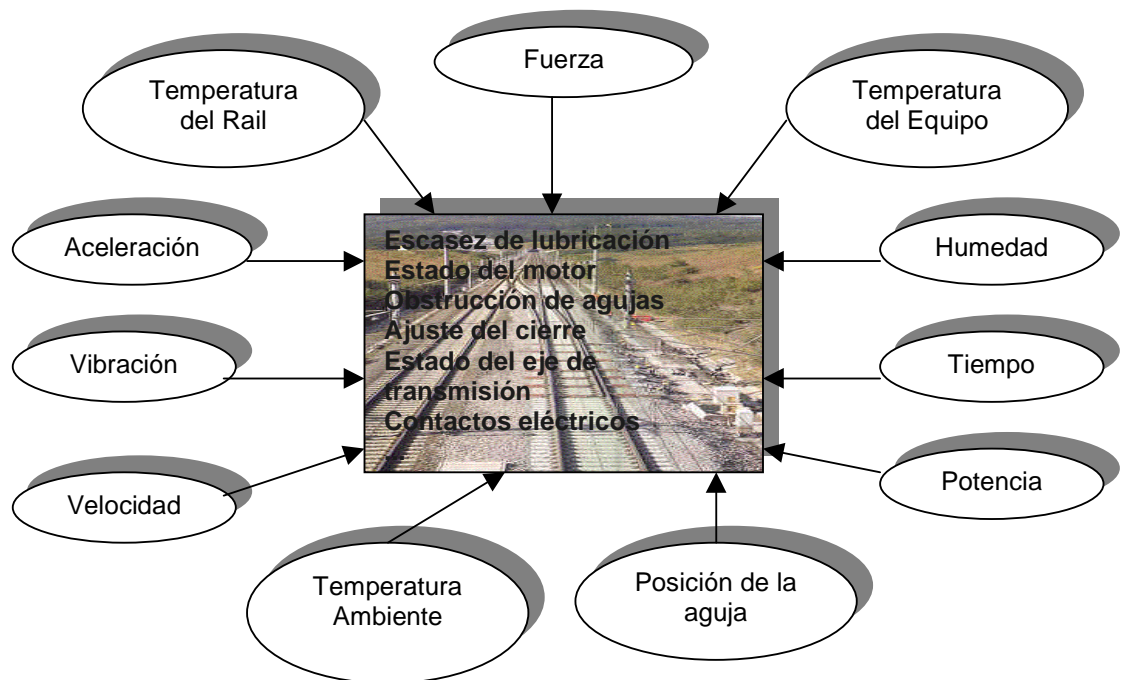


Figura 5.9.- Variables y fallos en los accionamientos de aguja

La señal que se ha tomado como representativa del estado del mecanismo del accionamiento de agujas ha sido la curva de la fuerza ejercida por el motor de accionamiento de agujas (N) frente al tiempo (s). Ejemplos de dichas señales son mostrados en la Figura 5.10 y Figura 5.11 para el sentido normal e inverso del movimiento del accionamiento de agujas respectivamente. En el eje de abscisas se representa el tiempo [ms] y en de ordenadas la fuerza [N]. Se observa en la Figura 5.10 que se parte de una importante fuerza de empuje en el sentido normal del movimiento de las agujas, y se concluye con una fuerza de tiro. Esta fuerza de tiro es necesaria para mantener a las agujas en su posición final debido al sistema de encerrojamiento empleado en el desvío. Dicha fuerza de tiro es de la que se parte para realizar el movimiento en el sentido inverso de las agujas, como se aprecia en la Figura 5.11, para concluir dicho movimiento con una fuerza de empuje, que al igual que el movimiento opuesto, servirá para mantener las agujas en la posición final del movimiento. Dicha fuerza es la que servirá para iniciar el movimiento en el sentido opuesto ya descrito anteriormente.

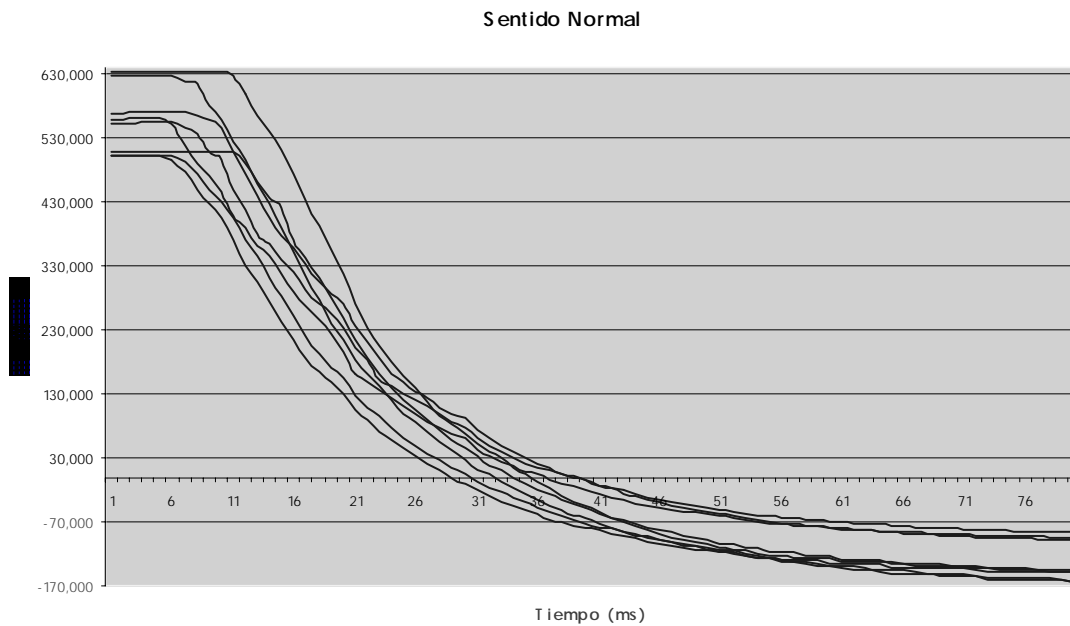


Figura 5.10.- Fuerzas del motor del accionamiento de agujas en el sentido normal

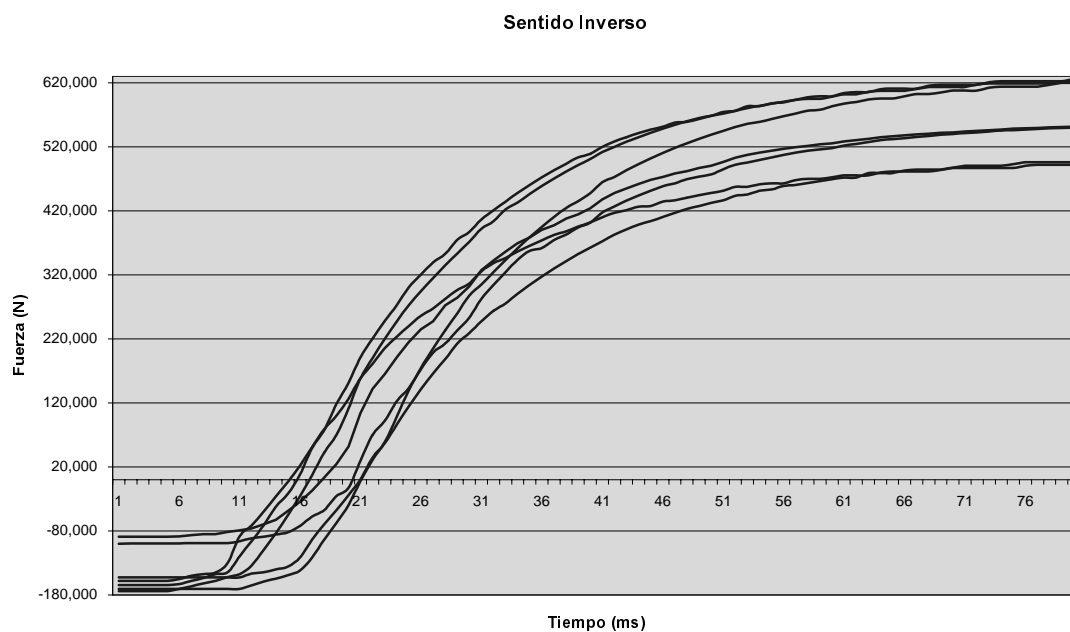


Figura 5.11.- Fuerzas del motor del accionamiento de agujas en el sentido inverso

Con el fin de considerar la degradación del estado del mecanismo de accionamiento de agujas como un sistema dinámico, la señal tomada como representativa del estado del mecanismo, d^k , ha sido la diferencia aritmética entre la señal de referencia, x^j , y la señal que

está siendo medida, x^k , siendo esta diferencia en valor absoluto, según indica la ecuación (5.1).

$$d_t^k = |x_t^k - x_t^j|, \quad (5.1)$$

donde t indica el instante de tiempo. Esta nueva curva toma una forma muy similar para todos los estados del mecanismo sin fallos, como puede observarse en la Figura 5.12(a) y Figura 5.12(b). La principal razón por la que las amplitudes de las curvas son diferentes se debe a la propia condición dinámica del mecanismo de accionamiento de agujas [18].

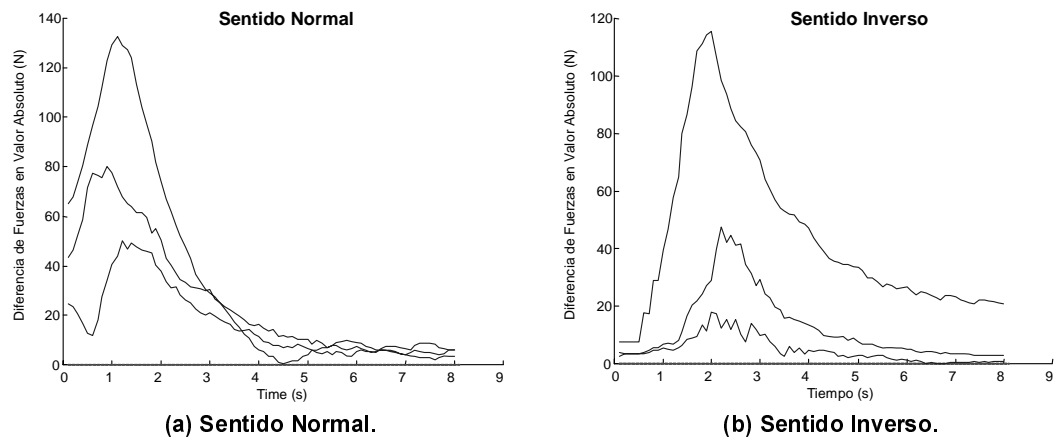


Figura 5.12.- Diferencias entre curvas fuerzas (N)-tiempo (s) que no representan fallos del mecanismo de accionamiento de agujas.

La nueva curva de referencia d^i , en el instante t (d_t^i), vendrá dada por la media aritmética entre la anterior curva de referencia d^{i-1} y la nueva curva que representa un estado del sistema que no contiene ningún fallo d^j . El valor de la nueva curva de referencia para un instante de tiempo t vendrá dado por la ecuación (5.2).

$$d_t^i = \frac{d_t^{i-1} + d_t^j}{2}. \quad (5.2)$$

Analizando la forma de las curvas que no representaban ningún fallo, se observó que:

- a) la posición de los máximos coincidía;
- b) que no había grandes distorsiones en la curva;
- c) que existía una relación directa entre las áreas de la curva a ambos lados del máximo.

Estas características han sido el origen de los tres criterios tenidos en cuenta en el modelo desarrollado por el autor para detectar los fallos analizando la curva objeto de estudio [16], las cuales se describen a continuación.

5.3.1 Primer criterio: Anomalías en la forma de la curva

Las irregularidades en la forma de la curva son debidas al funcionamiento del mecanismo del accionamiento de agujas y al ruido en la señal generado en el sistema de medida. Este ruido está provocado por la propia señal, así como por los distintos sensores y circuitos que están siendo empleados para poder obtener dicha señal.

Determinados tipos de fallos provocan que las anomalías que se dan en la forma de la curva de la señal sean mayor de un margen determinado. Este hecho constituye el primer criterio del modelo.

Por tanto, es necesario establecer un valor mínimo, a , en las perturbaciones de la señal, y clasificar los fallos en función de que se superen o no este valor, representado en la Figura 5.13. Para determinar este valor ha sido necesario realizar numerosos ensayos con fallos y sin ellos en el mecanismo de accionamiento. Para el sentido normal del movimiento de las agujas, el valor de a queda establecido en 14 N. En sentido opuesto en 17 N. En el sentido normal, tan sólo el 15.79 % de los fallos considerados en los experimentos no fueron detectados, y en el sentido inverso dicha relación fue del 18.84 %.

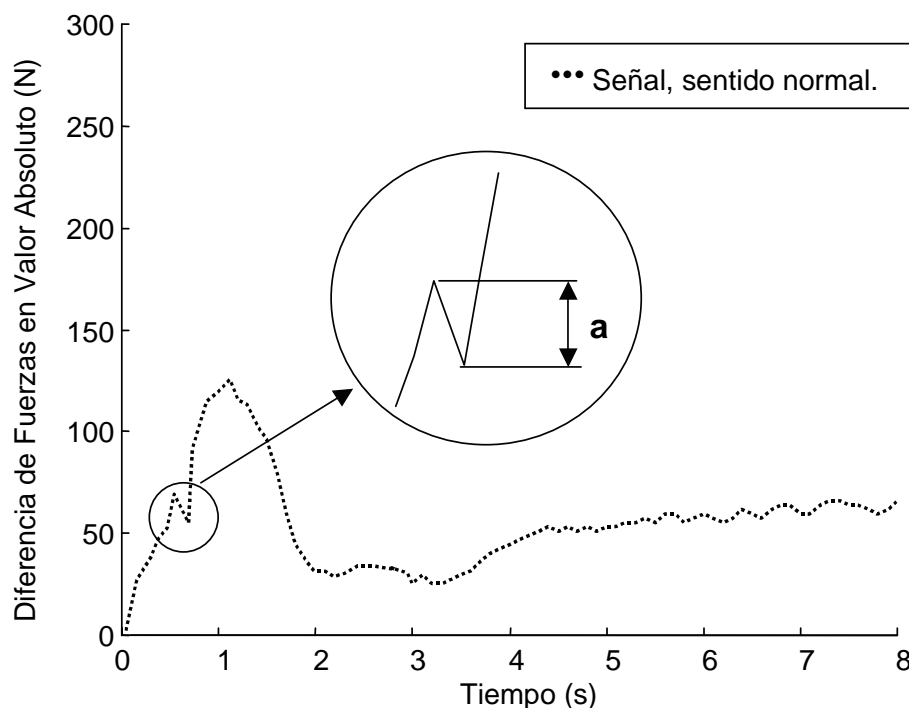


Figura 5.13.- Parámetro a correspondiente al primer criterio

Como es evidente, este primer criterio está analizando la señal en tiempo real y, aunque el porcentaje de los fallos detectados es alto, aun es susceptible de mejora. Por tanto, el autor, tras analizar las curvas correspondientes a los experimentos llevados a cabo, observó que existía una aproximación temporal en la posición del máximo de las curvas que no representaban fallos en el sistema y, por el contrario, las curvas que representaban algún tipo de fallo, carecía de dicha aproximación. Así pues, este ha sido el argumento en el que se fundamenta el segundo criterio, con el fin de detectar nuevos fallos que no están siendo detectados empleando tan solo el primer criterio.

5.3.2 Segundo Criterio: Posición del máximo de las curvas Fuerza (N) - Tiempo (s)

Como se ha mencionado en el criterio anterior, tras realizar numerosos experimentos, se comprobó que las posiciones de los máximos de las curvas que estaban siendo analizadas tenían una aproximación temporal entre las curvas no vinculadas a fallos del sistema. En cambio, las curvas que representaban algún fallo en el sistema, carecían de esta aproximación con respecto a las que no representaban ningún fallo. Así pues, el segundo criterio, basado en lo dicho anteriormente, viene dado por la ecuación (5.3),

$$t_{\max}^j \notin [t_{\max}^i - \Delta t, t_{\max}^i + \Delta t] \quad (5.3)$$

donde t_{\max} es el tiempo donde se da el máximo de la curva indicada por el superíndice, siendo éstos i para la curva de referencia y j para la curva objeto de estudio. Δt es el margen de tiempo considerado (ver Figura 5.14). La ecuación (5.3) nos indica que si el tiempo correspondiente a la posición del máximo de la curva que está siendo analizada, t_{\max}^j , no pertenece a la fracción de tiempo dada por $[t_{\max}^i - \Delta t, t_{\max}^i + \Delta t]$, esa curva se considera que está asociada a un fallo en el sistema.

El margen de tiempo empleado en el modelo ha sido de $\Delta t = 0.3$ s en ambos sentidos. En el sentido normal del movimiento de las agujas, considerando conjuntamente los dos criterios descritos, el porcentaje de fallos no detectados se reduce el 10 %. En el sentido opuesto, este porcentaje es del 12.26 %.

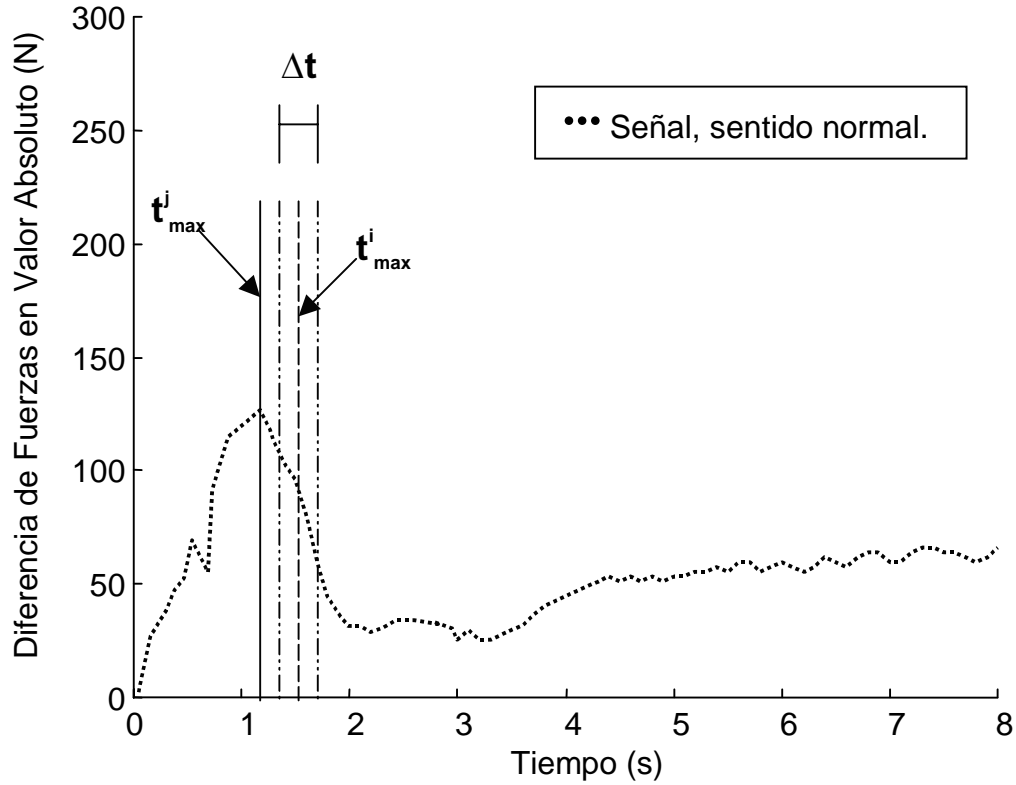


Figura 5.14.- Parámetros Δt , t_{max}^j y t_{max}^i correspondientes al segundo criterio

El segundo criterio, al contrario del primero, no es capaz de detectar fallos en tiempo real, puesto que ha de alcanzarse el máximo de la curva que está siendo analizada, aunque éste está comprendido dentro del primer cuarto del tiempo total del movimiento de las agujas.

5.3.3 Relación entre áreas de la curva separadas por el máximo

El tercer y último criterio considerado en el presente modelo se basa en la relación que guardan las áreas a ambos lados del máximo de la curva que está siendo analizada. Al igual que en los anteriores criterios, éste tiene su origen en el análisis de la forma de las curvas que están siendo analizadas tras realizar el movimiento de las agujas.

Las curvas correspondientes a los estados del sistema en los que no se da ningún fallo tienen en común que, las áreas comprendidas a ambos lados del máximo de dicha curva verifican la relación dada por la ecuación (5.4).

$$\left(\frac{t_{max}^j}{T^j - t_{max}^j} \right) \cdot \sum_{t=0}^{t=t_{max}^j} d_t^j \approx \sum_{t=t_{max}^j}^{t=T^j} d_t^j, \quad (5.4)$$

donde T^j es el tiempo total (ver Figura 5.15). Esta relación ha sido verificada con numerosos experimentos.

Aplicando los tres criterios conjuntamente, tan sólo un 4.35 % de los fallos contemplados no son detectados en el sentido normal del movimiento de las agujas, siendo la mejora aportada al considerar el tercer criterio del 2.23 %. En el sentido opuesto, esta mejora es del 3.16 %, quedándose sin detectar el 2.36 % de los fallos.

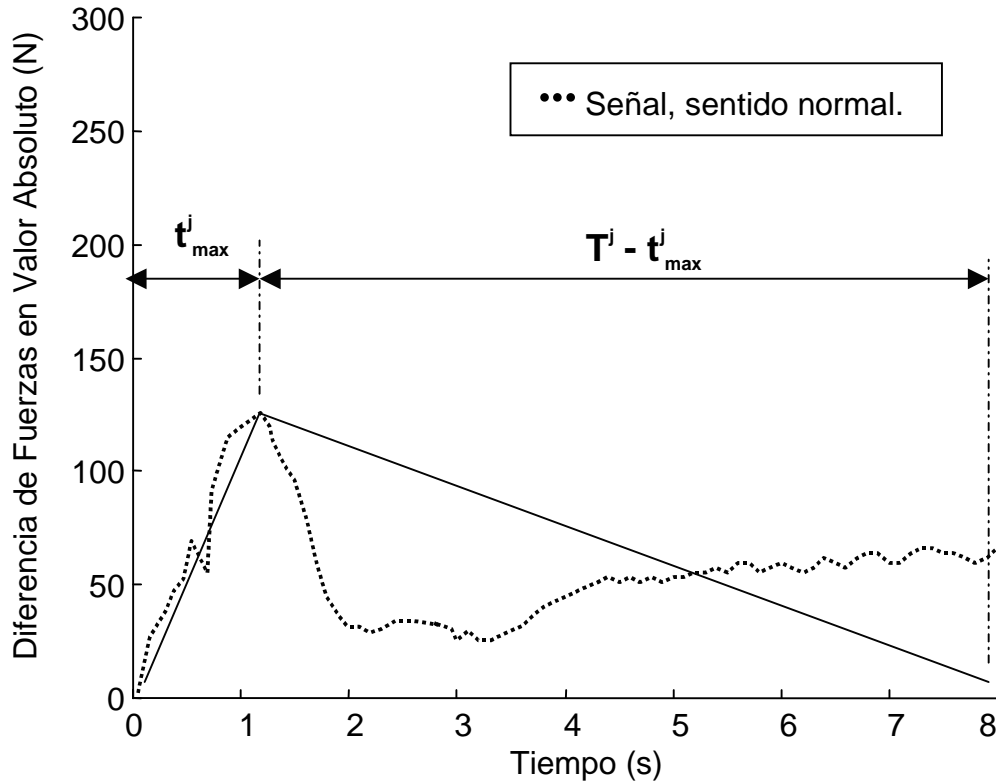


Figura 5.15.- Parámetros t_{max}^j , T^j correspondientes al tercer criterio

Al contrario que ocurría con los dos primeros criterios del modelo, para poder aplicar el tercer criterio, es preciso haber finalizado la operación del accionamiento de agujas.

En la Figura 5.16 se representa el diagrama de flujo del modelo. En él se ve como son analizados todos los datos de la señal de fuerza (N) para cada instante de tiempo empleando para ello los tres criterios del modelo.

En los sistemas de mantenimiento predictivo como el presentado en este documento, se suelen emplear el filtrado y la estimación como principales técnicas de tratamiento de las señales objeto de estudio.

El autor de la presente tesis ha desarrollado un modelo para el filtrado de las señales que se están estudiando. Este modelo se especifica en forma de Espacio de los Estados, en el que el Filtro de Kalman proporciona la estimación óptima de la señal limpia de ruido. La siguiente sección se dedica a la exposición del modelo utilizado.

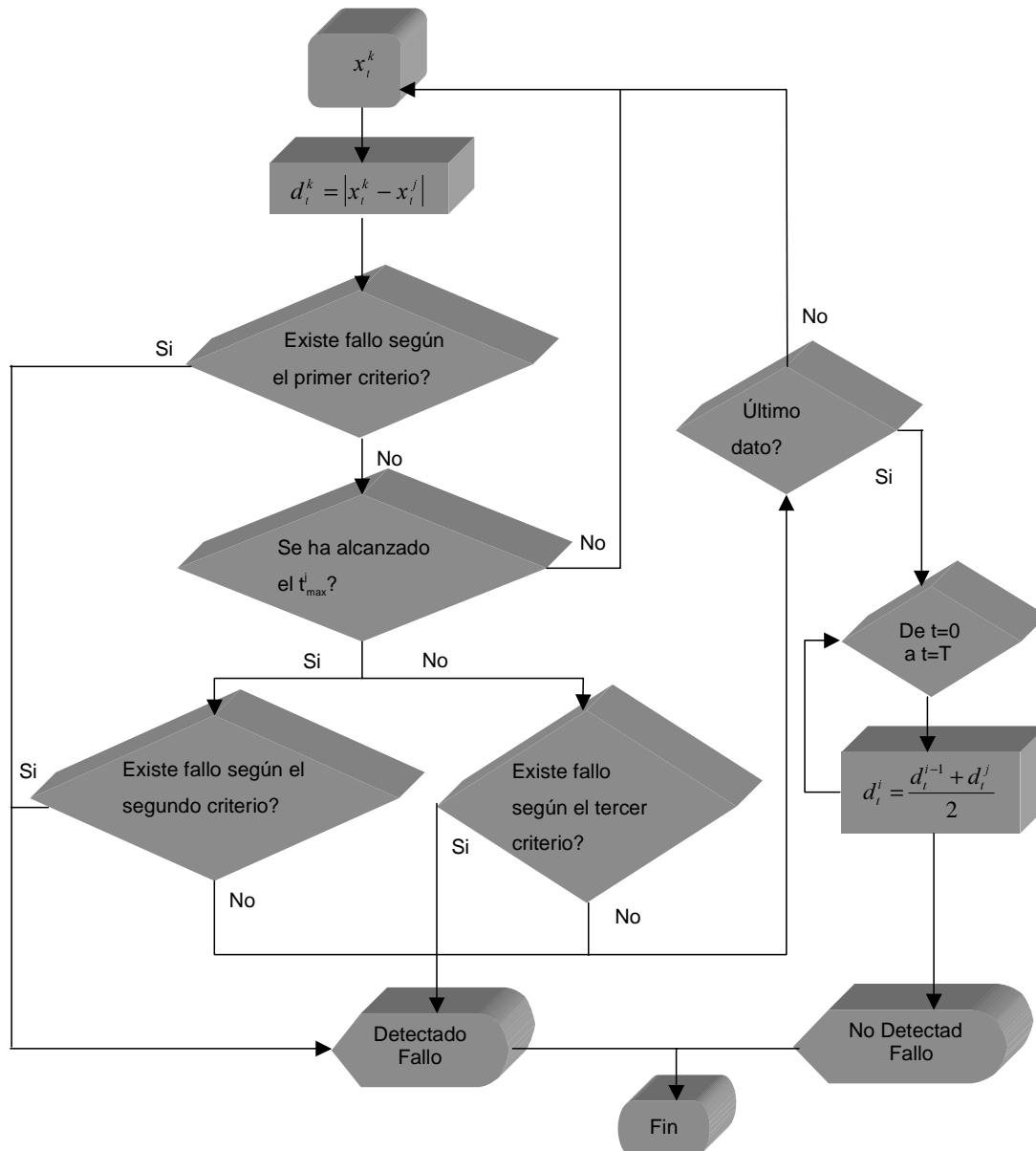


Figura 5.16.- Diagrama de Flujo del Modelo

5.4 Filtro de Kalman

5.4.1 Introducción

El filtrado y la estimación son dos herramientas ampliamente utilizadas en la ingeniería. Cuando el estado de un sistema tiene que ser estimado mediante la información proporcionada por sensores que aportan algo de ruido, entendiendo por ruido como la distorsión de la medida dada en la propia medida, es necesario recurrir a cierta clase de estimadores para poder obtener, de la forma más fiable como sea posible, la verdadera señal. En este proyecto se empleó el filtro de Kalman, desarrollado inicialmente por Rudolph Emil Kalman en 1960 (ver Anexo V) [25].

En la Figura 5.17 se representan la curva teórica de la corriente eléctrica [A] versus tiempo [s] de un motor eléctrico de accionamiento de agujas, siendo este tipo de motor el empleado en España, y la curva real de dicha señal, donde se consideran los ruidos ocasionados por el sistema o bien por los sensores que están siendo empleados, limitando los valores en ± 0.1 A con respecto a los valores de la señal teórica. Cuando este tipo de sistemas es dinámico, los modelos estudiados son lineales y las distribuciones de las perturbaciones son gaussianas, el Filtro de Kalman, en adelante FK, proporciona el estimador de error cuadrático medio mínimo. Si se cumplen todos los requisitos, excepto el de la distribución de las perturbaciones, entonces el FK proporciona el estimador con el error cuadrático medio mínimo de entre todos los estimadores lineales. El FK es uno de los algoritmos de tratamientos de datos más empleados para filtrar y estimar datos, debido a su simplicidad, optimalidad y robustez [25].

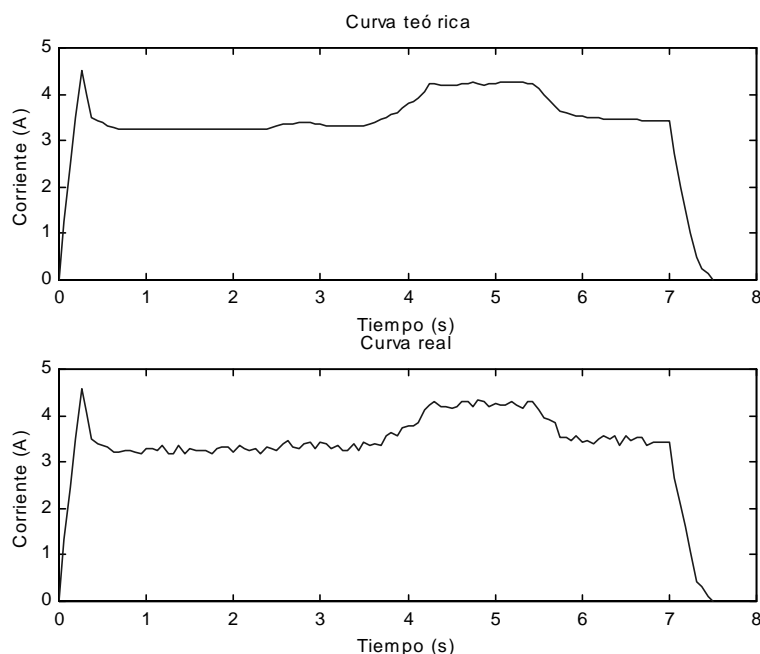


Figura 5.17.- Curvas teórica y real “corriente (A) versus tiempo (s)” de un motor eléctrico correspondiente al mecanismo del cambio de agujas

El vector de estado del proceso $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^m$, correspondiente al momento k , viene dado por la ecuación (5.5):

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k), \quad (5.5)$$

siendo $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^n$ el vector de entradas y $\mathbf{w}_k \in \mathcal{R}^n$ el ruido correspondiente a \mathbf{x}_k .

La ecuación que relaciona la media $\mathbf{z} \in \mathcal{R}^m$ con la variable del proceso \mathbf{x} viene dado por la ecuación (5.6):

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k), \quad (5.6)$$

donde $\mathbf{v}_k \in \mathcal{R}^l$ representa el ruido correspondiente a la medida \mathbf{z}_k . Los ruidos son considerados aleatorios e independientes entre si, cuyos valores de las medias y covarianzas vienen dados por las ecuaciones (5.7), (5.8) y (5.9):

$$\mathbf{E}[\mathbf{w}_k] = \mathbf{0}; \quad \mathbf{E}[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj}, \quad (5.7)$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{v}_k] = \mathbf{0}; \quad \mathbf{E}[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_j^T] = \mathbf{R}_k \delta_{kj}, \quad (5.8)$$

$$\mathbf{E}[\mathbf{w}_k \mathbf{v}_j^T] = \mathbf{0}, \quad (5.9)$$

donde E es la esperanza matemática y δ_{kj} es la función delta de Kronecker (ecuación (5.10)).

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1, & k = j, \\ 0, & k \neq j. \end{cases} \quad (5.10)$$

El FK debe ajustar y actualizar las ecuaciones mediante un estimador y unos nuevos datos de medida. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas:

- i) El primer paso es estimar el nuevo vector de estado \mathbf{x}_{k+1} y su matriz de varianzas y covarianzas en el siguiente instante $k+1$. Esta etapa es conocida como predicción de ecuaciones.

- ii) El siguiente paso consiste en utilizar la nueva información existente en el momento $k+1$ para actualizar las estimaciones en i). Esta etapa es conocida como reajuste de ecuaciones o actualización de la medida.

Por tanto, considerando $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ (5.11) como el estimador del vector de estado del proceso \mathbf{x}_{k+1} , conocido los datos de la medida \mathbf{z}_k en el instante k . La covarianza de esta estimación será $\mathbf{P}_{k+1|k}$ (5.12).

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{E}[\mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{k}) | \mathbf{Z}_k] \quad (5.11)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{E}[\{\mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}\} \{\mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}\}^T | \mathbf{Z}_k] \quad (5.12)$$

La probabilidad de \mathbf{x}_k dada una medida \mathbf{z}_k vendrá dada por la ecuación (5.13) (ver referencias [23] y [24]):

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{z}_k) \sim \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k). \quad (5.13)$$

El error estimado a posteriori \mathbf{e}_k viene definido según la ecuación (5.14).

$$\mathbf{e}_k \equiv \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k, \quad (5.14)$$

siendo la covarianza del error estimado la indicada por la ecuación (5.15).

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{E}[\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{e}_k^T] \quad (5.15)$$

Normalmente se desconoce el valor de los ruidos \mathbf{w}_k y \mathbf{v}_k en cada etapa del proceso. Así pues, una aproximación que normalmente se aplica en las ecuaciones (5.5) y (5.6) es despreciar dichos ruidos [22], quedando dichas expresiones definidas por las ecuaciones (5.16) y (5.17) respectivamente.

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{0}), \quad (5.16)$$

$$\tilde{\mathbf{z}}_k = \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}_k, \mathbf{0}), \quad (5.17)$$

siendo $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}$ y $\tilde{\mathbf{z}}_k$ las aproximaciones consideradas de los vectores de estado y de la medida respectivamente.

Con la intención de poder tener una relación mas sencilla entre las variables \mathbf{x}_{k+1} y \mathbf{z}_k , supondremos las siguientes aproximaciones en las ecuaciones (5.16) y (5.17), para obtener las ecuaciones (5.18) y (5.19) respectivamente:

$$\mathbf{x}_{k+1} \approx \tilde{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{A}_k (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{W}_k \mathbf{w}_k, \quad (5.18)$$

$$\mathbf{z}_k \approx \tilde{\mathbf{z}}_k + \mathbf{H}_k (\mathbf{x}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{V}_k \mathbf{v}_k, \quad (5.19)$$

donde \mathbf{A}_k , \mathbf{W}_k , \mathbf{H}_k y \mathbf{V}_k son matrices Jacobianas, cuyos elementos vienen dados por las siguientes igualdades (ecuaciones (5.20), (5.21), (5.22) y (5.23)):

$$\mathbf{A}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{f}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}} (\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{0}), \quad (5.20)$$

$$\mathbf{W}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{f}_{[i]}}{\partial \mathbf{w}_{[j]}} (\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{0}), \quad (5.21)$$

$$\mathbf{H}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{h}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}} (\tilde{\mathbf{x}}_k, \mathbf{0}), \quad (5.22)$$

$$\mathbf{V}_{[i,j]} = \frac{\partial \mathbf{h}_{[i]}}{\partial \mathbf{v}_{[j]}} (\tilde{\mathbf{x}}_k, \mathbf{0}), \quad (5.23)$$

Con esta nueva notación, se definen el error de predicción $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_k}$ y el residuo de medida $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_k}$ por las ecuaciones (5.24) y (5.25).

$$\tilde{\mathbf{e}}_k \equiv \mathbf{x}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k, \quad (5.24)$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_k} \equiv \mathbf{z}_k - \tilde{\mathbf{z}}_k. \quad (5.25)$$

Sustituyendo las igualdades (5.18) y (5.19) en las anteriores expresiones (5.24) y (5.25), se obtienen los valores de $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_{k+1}}$ y $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_k}$ dado por las ecuaciones (5.26) y (5.27).

$$\tilde{\epsilon}_{x_{k+1}} \approx A(x_k - \hat{x}_k) + \zeta_k, \quad (5.26)$$

$$\tilde{\epsilon}_{z_k} \approx H\tilde{\epsilon}_{x_k} + \varphi_k, \quad (5.27)$$

donde ζ_k y φ_k representan unas nuevas variables aleatorias e independientes, cuyas medias son cero y matrices de covarianza $\mathbf{W}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{W}_k^T$ y $\mathbf{V}_k \mathbf{R}_k \mathbf{V}_k^T$ respectivamente. Las variables \mathbf{Q} y \mathbf{R} son las matrices de covarianza de los ruidos \mathbf{W}_k y \mathbf{V}_k anteriormente descritos.

Hay que destacar que las ecuaciones (5.26) y (5.27) son relaciones lineales. Esto origina que se utilice el residuo de la medida, $\tilde{\epsilon}_{z_k}$ (ecuación (5.27)), y un hipotético segundo FK para estimar el error de predicción, $\tilde{\epsilon}_{x_{k+1}}$, dado en la ecuación (5.26). Este estimador, denominado $\hat{\epsilon}_k$, sustituido en la ecuación (5.24), se suele emplear para calcular el estimador del estado a posteriori del proceso, según se indica en la ecuación (5.28).

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \hat{\epsilon}_k. \quad (5.28)$$

Las variables aleatorias $\tilde{\epsilon}_{x_k}$, ζ_k y φ_k siguen aproximadamente las distribuciones normales dadas en las ecuaciones (5.29), (5.30) y (5.31), ver referencia [23].

$$p(\tilde{\epsilon}_{x_k}) \sim N(0, E[\tilde{\epsilon}_{x_k} \tilde{\epsilon}_{x_k}^T]), \quad (5.29)$$

$$p(\zeta_k) \sim N(0, \mathbf{W}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{W}_k^T), \quad (5.30)$$

$$p(\varphi_k) \sim N(0, \mathbf{V}_k \mathbf{R}_k \mathbf{V}_k^T). \quad (5.31)$$

Considerando las aproximaciones de las ecuaciones (5.29), (5.30) y (5.31), la ecuación del FK empleada para estimar $\hat{\epsilon}_k$ vendrá dado por la ecuación (5.32)

$$\hat{\epsilon}_k = \mathbf{K}_k \tilde{\epsilon}_{z_k}, \quad (5.32)$$

donde \mathbf{K}_k se define como el factor de ganancia del filtro de Kalman. Este factor hace mínima la covarianza del error de medida. Dicho factor de ganancia viene dado por la ecuación (5.33) (ver referencia [22]).

$$\mathbf{K}_k = (\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T) (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \quad (5.33)$$

estando \mathbf{P}_k^- expresado según la ecuación (5.34).

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{W}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}^T. \quad (5.34)$$

5.4.2 Aplicación del Filtro de Kalman

En esta sección el autor describe la aplicación del FK a la señal de la corriente eléctrica de un motor de accionamiento de agujas de un desvío ferroviario de los empleados en España [14].

Para especificar el modelo utilizado hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Estamos analizando la señal de Corriente [A] versus Tiempo [s], con lo que las variables consideradas hasta ahora serán escalares y reales.
- La aproximación en el vector de estado en el instante $k+1$ será igual al estimador del vector de estado en el instante k , es decir, $\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_{k+1}$.
- El filtro no cambiará de una etapa a la siguiente, por tanto, $A = 1$.
- El ruido se ha tenido en cuenta tan solo en la medida, por lo que $w = 0$.
- No hay control sobre los valores de entrada, por lo que el vector de iniciación será $u = 0$.

Teniendo en cuenta las anteriores aproximaciones, las ecuaciones (5.18), (5.26) y (5.34) quedarán de la siguiente forma

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k, \quad (5.35)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q}_{k-1}. \quad (5.36)$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}_{k+1}} = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k + \zeta_k, \quad (5.37)$$

- El estado es medido directamente, así pues $H = 1$. El factor de ganancia, K_k (5.33), se puede expresar ahora por la ecuación (5.38), P_k por la ecuación (5.39) y $\tilde{\mathbf{e}}_{\mathbf{z}_k}$, ecuación (5.27), por la ecuación (5.40).

$$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R_k}, \quad (5.38)$$

$$P_k = P_k^- (1 - K_k), \quad (5.39)$$

$$\tilde{e}_{z_k} = \tilde{e}_{x_k} + \varphi_k. \quad (5.40)$$

- Para inicializar el algoritmo, se debe asignar un valor a \hat{x}_k , siendo éste valor supuesto normalmente como $\hat{x}_{k=0} = 0$. Como no siempre es así, el valor considerado a P_k^- en el instante inicial deberá ser distinto de cero, normalmente con valor alto.

En la Figura 5.18 se representa la forma de la señal aplicando el FK considerando Q variable, con valores de Q = 0.5, 0.05, 0.005 y 0.0005. Se observa en dicha Figura 5.18 que el valor de Q óptimo es para Q = 0.05. Para valores de Q muy bajos, por ejemplo Q = 0.0005, la curva filtrada no representa correctamente la curva real, teniendo una forma muy aplanada y presentando muy poca sensibilidad antes los cambios que se dan en la curva real. Por el contrario, para valores de Q mayores, Q = 0.5, dicha curva filtrada presenta una forma muy similar a la curva real, cuya diferencia principal con la misma es que está adelantada en el tiempo. Este caso tampoco sería idóneo, ya que la curva filtrada no podría eliminar los ruidos que contiene la curva real, ya que el principal interés es conseguir una mayor sensibilidad para observar pequeñas perturbaciones en la curva teórica, las cuales nos sirvan para detectar los fallos que se están dando en el mecanismo. En todos los casos se ha considerado un valor constante de R = 0.1.

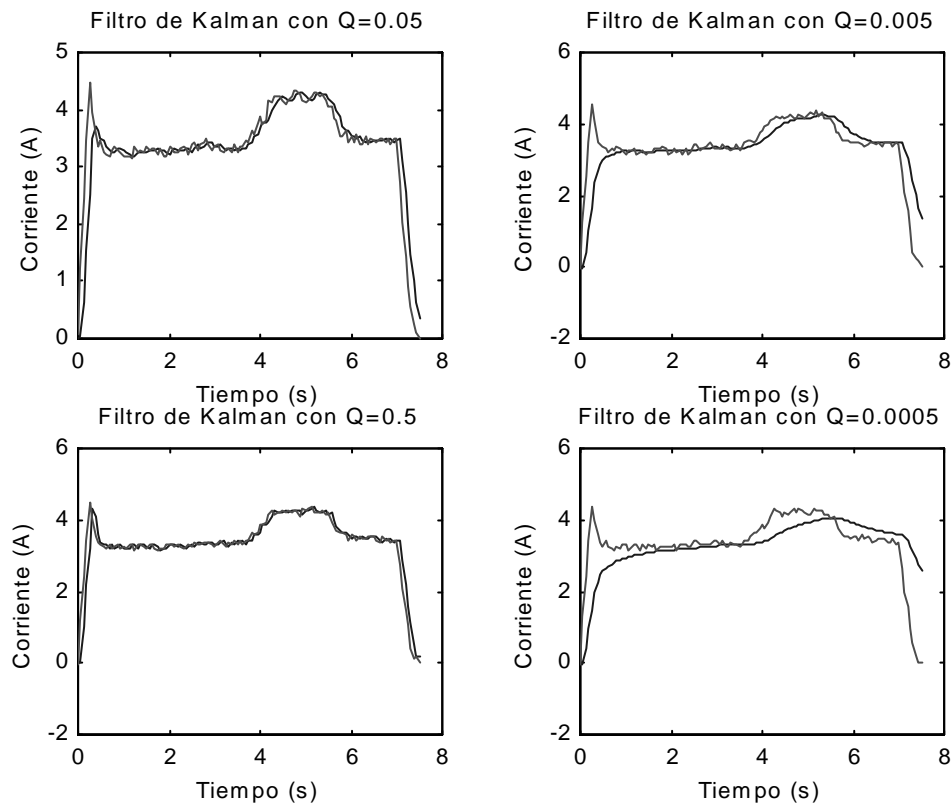


Figura 5.18.- Filtro de Kalman aplicado a la medida de la corriente [A] del motor de accionamiento de agujas versus tiempo [s], considerando el factor Q variable. - - Señal filtrada, — señal real.

La forma de la curva filtrada considerando R variable es muy similar al experimentado considerando Q variable, aunque las formas que toma la curva filtrada siguen un comportamiento distinto en función de la magnitud de la variable considerada. Como se aprecia en la Figura 5.19, el valor óptimo de R es cuando éste toma el valor de 0.1. Para valores de R pequeños, por ejemplo $R = 0.001$, la forma de la curva filtrada es muy similar a la curva real y, por el contrario, para valores muy altos, $R = 1$, la forma de la curva filtrada es muy aplanada. En todas las simulaciones se ha considerado un valor constante de $Q = 0.05$. Las conclusiones tomadas según la forma de la curva filtrada son las mismas que las expuestas anteriormente considerando Q variable.

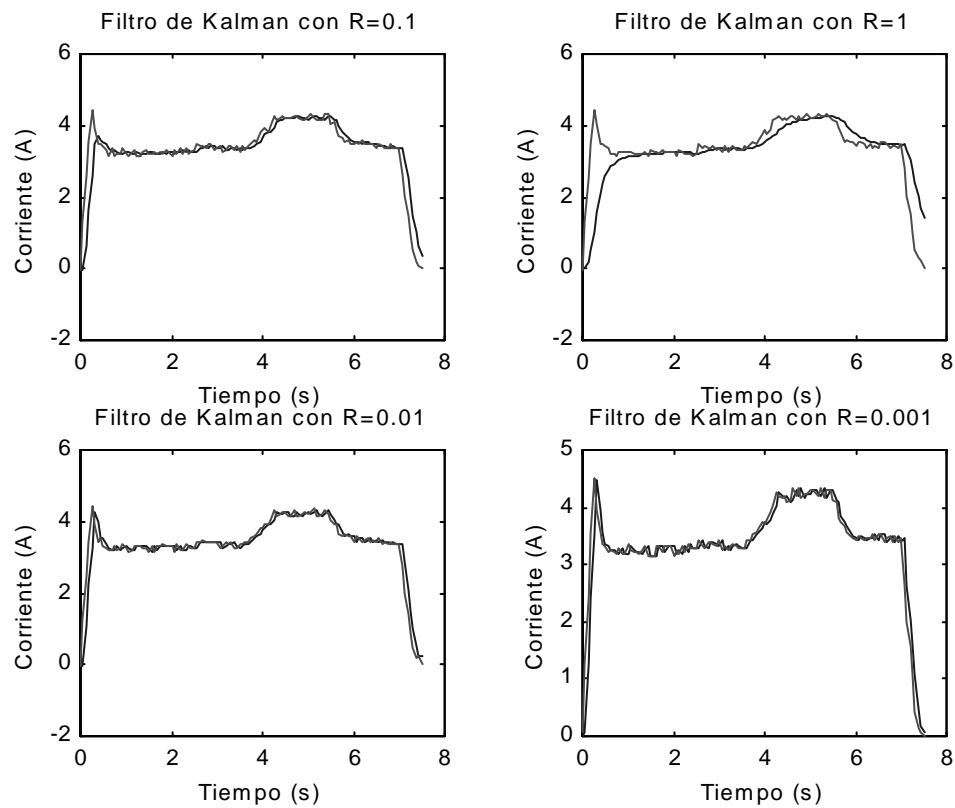


Figura 5.19.- Filtro de Kalman aplicado a la medida de la corriente [A] del motor de accionamiento de agujas versus tiempo [s], considerando el factor R variable. - - Señal filtrada, — señal real.

5.4.3 Resultados de los Experimentos

La variable física representativa de la condición del accionamiento de agujas ha sido la corriente del motor [A], como es la representada en la Figura 5.17. Así pues, para determinar el estado del mecanismo, será necesario comparar esta variable con los valores representativos del estado del equipo con el fin de tener un control del estado del sistema.

Para ello, se han identificado en la señal que está siendo analizada las principales operaciones en la maniobra del mecanismo del cambio de agujas. Dichas operaciones se muestran en la Figura 5.20, cuya fuente de información ha sido tomada de la referencia [34].

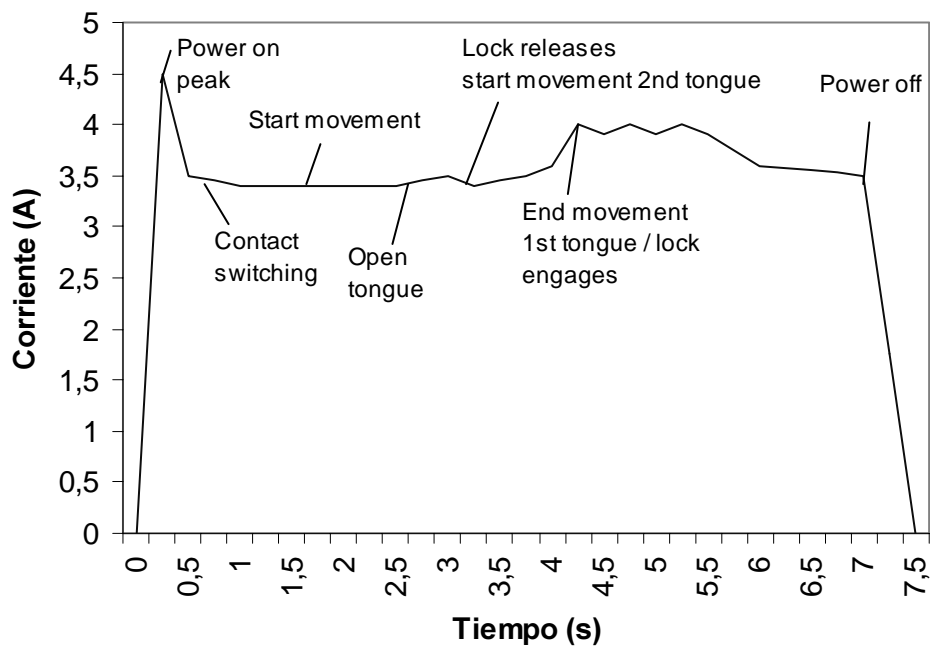


Figura 5.20.- Identificación de las operaciones del mecanismo de accionamiento de agujas en la curva de la corriente de su motor (Fuente: referencia [34])

En la Figura 5.21 se ha dividido la curva representada en la Figura 5.17 en cuatro secciones, con el fin de poder identificar las distintas anomalías de los elementos críticos del sistema con respecto a las perturbaciones de dicha curva. A continuación se muestran los fallos mas comunes de los elementos críticos del mecanismo dados en las distintas secciones anteriormente señaladas.

- En la sección 1, comprendida entre los dos primeros segundos el movimiento, las variaciones en la curva de la corriente del motor corresponden a fallos debido al motor de accionamiento, fuerzas de fricción en el movimiento inicial de las agujas, potencia eléctrica suministrada al motor o fallos en el embrague.
- En la sección 2, dada durante el siguiente segundo y medio, se dan los fallos ocasionados por la apertura del mecanismo del cerrojo del sistema.
- En la sección 3, enmarcada aproximadamente desde el último cuarto del tercer segundo al sexto segundo, se identifican los fallos correspondientes a las partes móviles de la aguja.
- En la sección 4, los fallos ocasionados en este último periodo de funcionamiento del mecanismo son debidos a un mal ajuste o funcionamiento del cierre cerrojo del sistema.

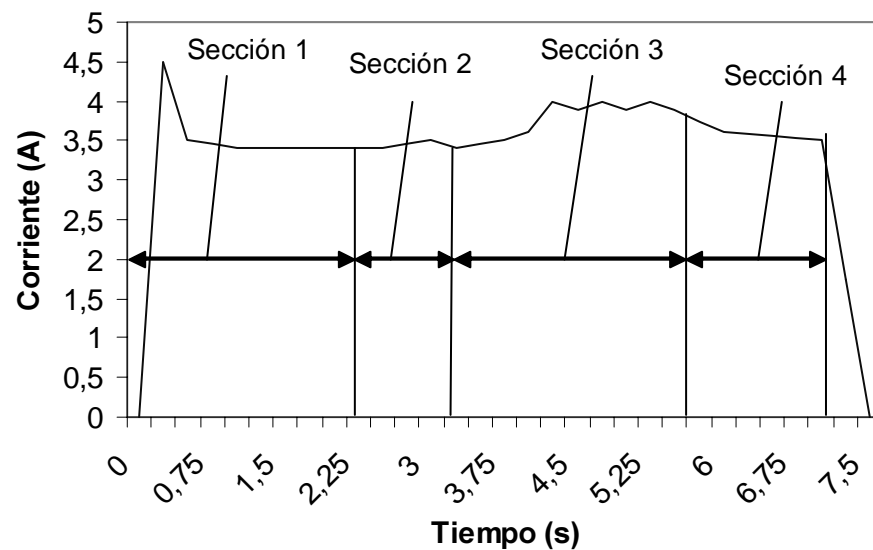


Figura 5.21.- División en secciones de la curva de la corriente [A] versus tiempo [s] del motor de un mecanismo de accionamiento de agujas.

El principal objetivo en los experimentos realizados ha sido poder analizar la sensibilidad del algoritmo para detectar un determinado fallo, el cual se simula mediante una distorsión de la curva teórica de la corriente [A] versus tiempo [s] del motor de accionamiento del mecanismo de accionamiento de agujas. En la señal analizada para detectar dicho fallo, se ha introducido ruido de forma aleatoria tanto en la señal como en la medida, limitado éste en ± 0.1 A.

En los experimentos llevados a cabo, se ha modificado la curva teórica (ver Figura 5.17) para representar dicho fallo, generando dos distorsiones de + 0.05 A y + 0.1 A en el intervalo {1.13, 2.06} s, como puede apreciarse en la Figura 5.22. El fallo que se está simulando se estaría produciendo en la sección 1 (ver Figura 5.21), cuyo elemento crítico afectado sería, según lo indicado en la sección anterior, el motor de accionamiento, fuerzas de fricción en el movimiento inicial de las agujas (posible falta de lubricación), potencia eléctrica suministrada al motor o un fallo en el embrague.

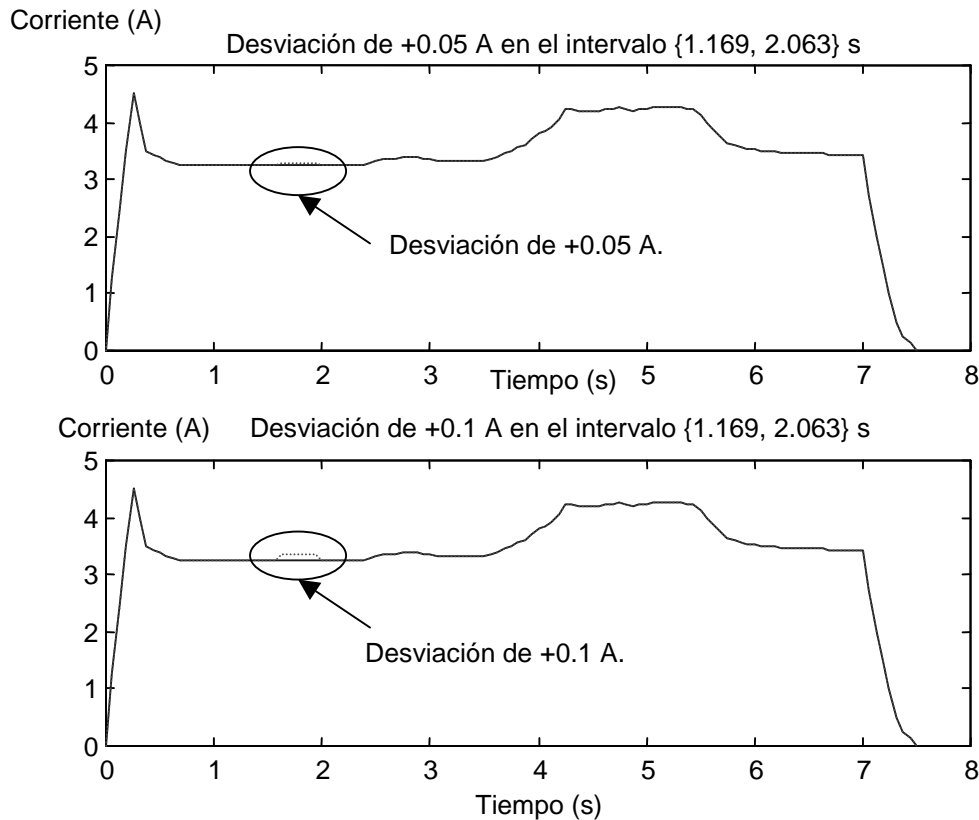


Figura 5.22.- Desviaciones de 0.05 y 0.1 A en el intervalo {1.169, 2.063} s de la curva teórica mostrada en la Figura 5.17.

Para poder detectar el fallo provocado, se ha analizado primeramente la curva real y posteriormente la curva filtrada, con el fin de poder estudiar la efectividad del filtro en la detección de fallos en este tipo de sistemas. Para ello, se realizaron 100 experimentos en cada considerado de desviaciones de + 0.05 y + 0.1 A. En el caso de la desviación de + 0.05 A, el fallo se detectó en el 13 % de los experimentos, mientras que analizando la curva filtrada fue en el 29 %, es decir, en más del doble de ocasiones. Por otro lado, cuando la desviación que representaba el fallo es de + 0.1 A, el número de veces que se manifestó dicho fallo analizando la curva real fue en el 50 % de los experimentos, y empleando la curva filtrada fue del 88 %, un 38 % superior que si analizásemos la curva real directamente. Dichos resultados se muestran en la Tabla 5.1, donde se recogen los datos referente a la media \bar{e} , ecuación (28), la varianza s^2 , ecuación (29), y el número de desviaciones mayores al valor $d_{a,b}$, donde el subíndice a representa la medida sin filtrar, m , o bien la misma señal aplicándola el filtro de Kalman, f , y el subíndice b es el valor provocado de la desviación en la señal en el intervalo {1.169, 2.063} s (0.05 o 0.1 A). Las diferencias en valor absoluto entre la señal de referencia y la señal a la que se le ha provocado la perturbación de + 0.05 A o + 0.1 A, correspondientes a 100 simulaciones, se presentan en la Figura 5.23.

Todos estos resultados vienen dados en la referencia [15].

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=0}^{i=T} e_i}{T}, \quad (5.41)$$

$$s^2 = \frac{1}{T-1} \left[\sum_{i=0}^{i=T} e_i^2 - \frac{1}{T} \left(\sum_{i=0}^{i=T} e_i \right)^2 \right]. \quad (5.42)$$

	Fallos	\bar{e}	s^2
$d_{m,0.05}$	13	0.0686	0.0115
$d_{f,0.05}$	29	0.0400	0.0056
$d_{m,0.1}$	50	0.0697	0.0120
$d_{f,0.1}$	88	0.0418	0.0057

Tabla 5.1.- Fallos detectados en la señal sin filtrar, m , y filtrada, f , en 100 simulaciones, donde \bar{e} y s^2 son la media y la varianza respectivamente. Las variaciones en la curva son 0.05 A. y 0.1 A.

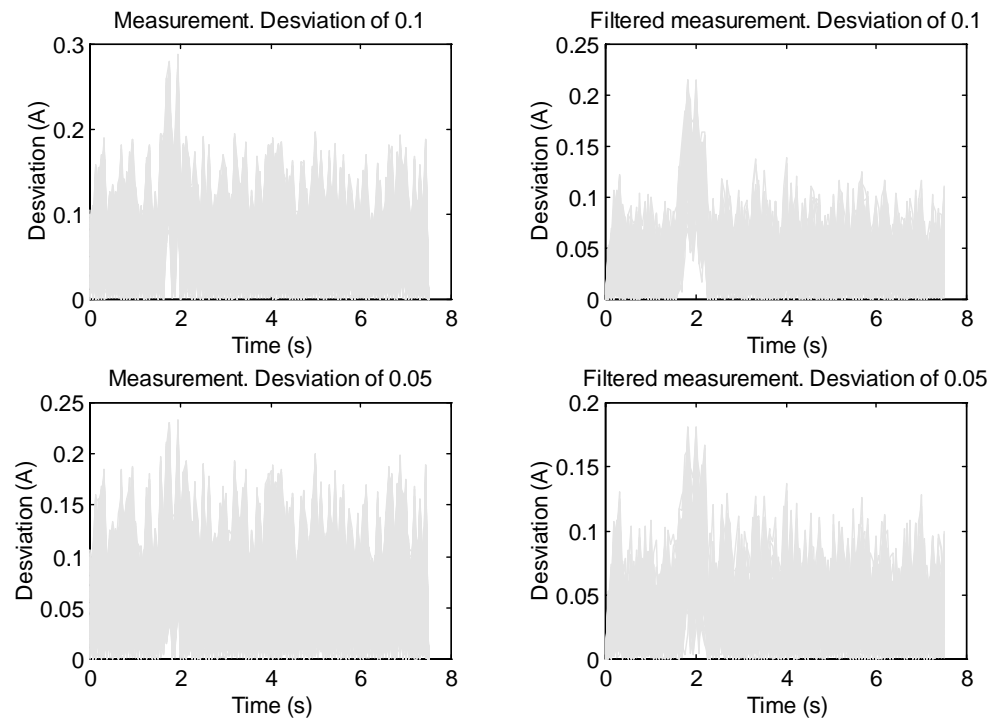


Figura 5.23.- Diferencias entre la señal de referencia y la curva con la perturbación (ver Figura 5.22) [13]

5.4.4 Resultados obtenidos empleando el modelo con y sin Filtro de Kalman

En el trabajo de investigación introducido al comienzo del capítulo se ha desarrollado un modelo basado en tres criterios, el cual se ha descrito anteriormente. Los parámetros de los que dependen los criterios del modelo dependen de la señal que se esté analizando. Con el fin de analizar la sensibilidad de dichos parámetros se han llevado a cabo numerosos experimentos [13]. Las simulaciones se basan en el análisis en tiempo real de la señal que está siendo tratada, como se muestra en la Figura 5.16, y en los resultados obtenidos se comparan con los relativos a la señal filtrada (ver Figura 5.24(a) y Figura 5.24(b)) y la original (ver Figura 5.12 (a) y Figura 5.12(b)).

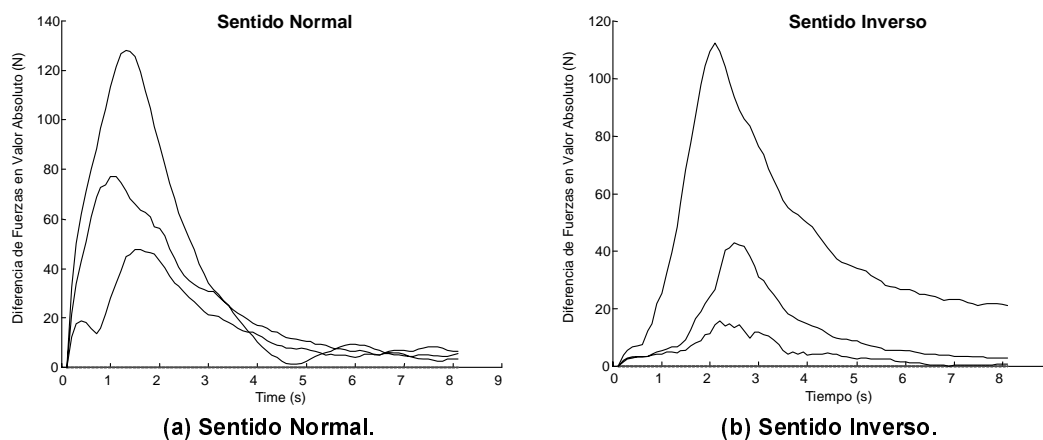


Figura 5.24.- Diferencia en valor absoluto entre la señal que está siendo analizada y la señal de referencia empleando el FK

El margen de error, a (ver Figura 5.13), para el análisis de la forma de la señal, se consideró desde 0.5 N hasta 1000 N, realizándose 2000 experimentos para una de las señales que fue considerada, es decir, 72 en el sentido normal (Figura 5.25(a)) y 79 en el sentido inverso (Figura 5.25(d)) del movimiento del accionamiento de agujas. Así pues, 11.520.000 y 12.540.000 datos fueron analizándose el sentido normal e inverso respectivamente. Estas mismas simulaciones fueron llevadas a cabo empleando también el filtro de Kalman. Aproximadamente, desde el valor 275 N, el número de fallos detectados empleando el criterio considerado no varía en ambas direcciones. De este modo, la importancia de este criterio no es muy importante para detectar fallos, aunque se observa que empleando el FK este valor descende hasta 120 N. Las curvas en ambas direcciones son muy similares, pero la zona estable es menor en el sentido inverso que en el normal, estando dicha más alejada del origen. La conclusión principal es que el empleo de este criterio es más aconsejable llevarlo a cabo en el sentido inverso del movimiento del accionamiento de agujas. Tomando valores pequeños de este parámetro, el modelo ya es capaz de poder detectar numerosos fallos, aunque por sí solo no es capaz de detectar el suficiente número de fallos.

La variación del margen de tiempo del máximo de la curva de la señal que está siendo estudiado del máximo, Δt (ver Figura 5.14), se consideró desde 1 ms a 100 ms, realizándose 80 experimentos para cada una de las 72 curvas en el sentido normal (ver Figura 5.25(b)) y 79 curvas en el sentido inverso (ver Figura 5.25(e)), por lo que fueron analizados 468.800 y 505.600 datos respectivamente. Estos mismos experimentos fueron llevados a cabo empleando el FK. En las curvas obtenidas se observa claramente dos etapas, en los instantes de 10 ms y 60 ms. En el sentido inverso, las curvas obtenidas en los experimentos son similares tanto si se emplea el filtro de Kalman como si no, pero esto solo sucede para este parámetro y para esta dirección.

La relación entre las áreas (ver Figura 5.15) de la curva que está siendo analizada se consideró variable desde 0 a 9 con intervalos de 0.1. Se han llevado a cabo 90 simulaciones en el sentido normal para las 72 consideradas hasta ahora, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.25(c), analizándose 518.400 datos. En el sentido inverso, se realizaron 200 experimentos en las 79 curvas consideradas, estudiándose un total de 1.264.000 datos mostrados en la Figura 5.25(f). Estos mismos experimentos fueron realizados empleando el FK. La conclusión más relevante es que la curva converge rápidamente hacia el máximo. Considerando el valor de 1, se pueden detectar la totalidad de los fallos, aunque tampoco se detectaría ninguna curva que representara un estado sin fallo. Analizando la curva que se obtiene tras emplear el FK, se observa que la convergencia de ésta es más lenta. En el sentido inverso, la forma de la curva es más uniforme que en el sentido normal, y la convergencia de la misma es mayor.

De este modo, se observa que mediante el empleo de cada criterio de forma independiente se pueden detectar numerosos fallos, pero de esta forma son numerosos los fallos que no son detectados. Este es el motivo por el que se han considerado los tres criterios de forma conjunta en el modelo.

En los experimentos realizados, empleando el modelo sin el Filtro de Kalman en el sentido normal del movimiento de las agujas se detectó el 94,2% de la totalidad de los fallos considerados, mientras que en el sentido contrario se detectaron el 97,33% de los fallos.

Empleando en dicho modelo el Filtro de Kalman se consiguieron mejoras sustanciales del 2,9 % de fallos detectados en sentido normal, y del 2,67 % en sentido contrario al movimiento de las agujas, detectándose en este sentido la totalidad de los fallos considerados

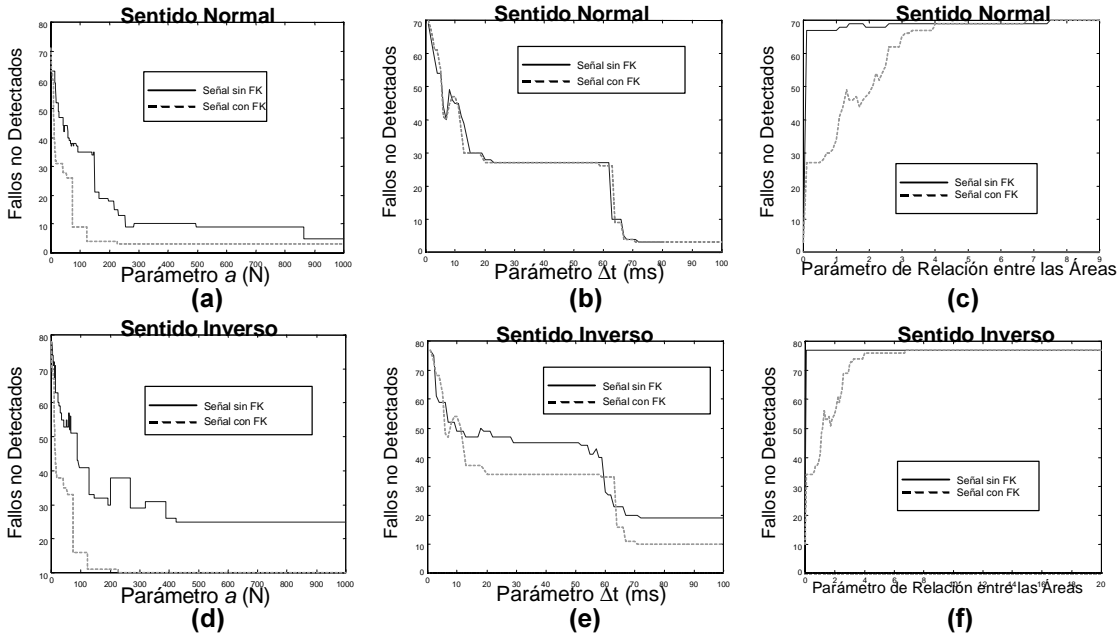


Figura 5.25.- Experimentos de los parámetros considerados en el modelo

5.5 Modelos de componentes no observables

Los modelos que se presentan a continuación para analizar el estado del accionamiento de agujas en tiempo real se engloban dentro de los modelos denominados Modelos de Componentes No observables (Unobserved Components, UC). En la bibliografía se han publicado muchas versiones diferentes de modelos UC, pero una de las más generales es la que aparece en la ecuación (5.43)

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{T}_t + \mathbf{C}_t + \mathbf{S}_t + \mathbf{f}(\mathbf{u}_t) + \mathbf{N}_t + \mathbf{e}_t \quad (5.43)$$

donde \mathbf{y}_t es el vector de tamaño m de las variables observadas; \mathbf{T}_t es un conjunto de componentes de tendencia para cada variable observada; \mathbf{C}_t es un componente cíclico (se supone que siempre tiene un periodo mayor de un año); \mathbf{S}_t es un componente estacional (o cíclico con un periodo de un año); $\mathbf{f}(\mathbf{u}_t)$ es una función de relaciones lineales o no lineales entre las salidas y las entradas; \mathbf{N}_t es un vector de ruido coloreado; y \mathbf{e}_t se suele denominar componente irregular y es un vector de variables de ruido blanco de dimensión m con media cero y matriz de covarianzas no diagonal \mathbf{R}_t , proveniente de una distribución gaussiana. Es obvio que no todos los componentes del modelo expresado en la ecuación (5.43) son necesarios en todas y cada una de las aplicaciones. Así pues, la selección de los componentes deberá realizarse con extremo cuidado en cada caso.

El modelo se deberá completar con el comportamiento dinámico específico de cada uno de los componentes de las ecuaciones (5.43). Distintas posibilidades, para el modelo dado por la ecuación (5.43), se presentan en las referencias [20] y [32].

La forma natural de trabajar con este tipo de modelos es mediante su formulación en el marco del Estado de los Espacios (State Space, SS). En concreto, (5.43) puede ser considerada como ecuaciones de observación de un sistema SS estocástico en tiempo discreto en el que las Ecuaciones de Estado reflejan el comportamiento dinámico del sistema mediante la relación del valor actual de los estados con sus valores pasados, considerando tanto entradas deterministas como estocásticas. Existe un gran número de formulaciones diferentes para estas ecuaciones (como (5.5) y (5.6) de la sección anterior), pero una de las más usadas dentro de la bibliografía referente a los modelos UC es la dada por la ecuación (5.44) [3] y [32]:

$$\begin{aligned} \text{Ecuaciones de estado} &: \mathbf{x}_{t+1} = \Phi_t \mathbf{x}_t + \Gamma_t \mathbf{u}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{w}_t & (i) \\ \text{Ecuaciones de medida} &: \mathbf{z}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{D}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{C}_t \mathbf{v}_t & (ii) \end{aligned} \quad (5.44)$$

donde \mathbf{z}_t es el vector de dimensión m de las variables observables (salidas) para $t=1,2,\dots,N$; \mathbf{x}_t es un vector de estado estocástico de dimensión n ; \mathbf{u}_t es un vector de dimensión k de variables de entrada deterministas (exógenas); \mathbf{w}_t es un vector de dimensión r de entradas de ruido blanco gaussiano con media cero y con matriz de covarianza \mathbf{Q}_t ; y \mathbf{v}_t es un vector de dimensión s de variables de ruido blanco gaussiano con media cero y matriz de covarianzas \mathbf{R}_t . En general, el vector \mathbf{v}_t se considera independiente de \mathbf{w}_t (aunque no tiene por qué ser necesariamente así), siendo estos dos vectores de ruido independientes del vector de estado inicial \mathbf{x}_0 . $\Phi_t, \Gamma_t, \mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t, \mathbf{D}_t, \mathbf{C}_t, \mathbf{Q}_t$ y \mathbf{R}_t son, respectivamente, las matrices del sistema de dimensiones $n \times n, n \times k, n \times r, m \times n, m \times k, m \times r, r \times r$ y $s \times s$, donde algunos de los elementos son conocidos y otros necesitan ser estimados.

5.5.1 Estimación del vector de estado

Dado el modelo (5.43) escrito en la forma SS (5.44), el problema de estimación consiste en encontrar los momentos de primer y segundo orden (media y matriz de covarianzas) del vector de estado, condicionados a toda la información dada en la muestra (salidas y entradas, si existen). Asumiendo que todas las perturbaciones del modelo son gaussianas, el Filtro de Kalman (FK) proporciona los estados óptimos de cada momento, tales que minimizan el Error Cuadrático Medio (Mean Squared Error, MSE). En determinados contextos, especialmente en los modelos UC, se utiliza además el algoritmo de Suavizado Fijo (Fixed Interval Smoothing, FIS), el cual proporciona, al igual que el FK, la estimación óptima de los estados y su matriz de covarianzas, pero con un conjunto de información más amplio, como se muestra más abajo. Las ecuaciones para ambos algoritmos se dan en el Anexo VI.

El FK realiza la estimación del vector de estado \mathbf{x}_t en el momento t , basado en la información suministrada por la muestra hasta dicho momento (normalmente denotado como $\hat{\mathbf{x}}_{t|t}|\mathbf{Z}_t, \mathbf{u}_t$). Por el contrario, el algoritmo FIS se aplica posteriormente a la acción de filtrado, corre en sentido inverso al tiempo, y consigue una estimación basada en toda la muestra, por lo que su MSE tiene que ser menor al que alcanza el FK (normalmente el estimador FIS se denota por $\hat{\mathbf{x}}_{t|N}|\mathbf{Z}_N, \mathbf{u}_N, i=1,2,\dots$). Estos algoritmos son estándar en la bibliografía y se exponen con detalle en muchas referencias, por lo que no consideramos necesario extendernos, ver por ejemplo [6], [20], [26], [27], [39] y [38].

Una característica muy importante de estos algoritmos es que la ausencia de determinados observaciones en las salidas no plantea ningún problema dada la propiedad de recursividad de los algoritmos, ya que dichas observaciones son reemplazadas por sus valores esperados, condicionados por el modelo y el resto de información de la muestra. Si dichas observaciones corresponden al final de la muestra el FK predice de la señal mientras que, si corresponden al inicio o a algún punto intermedio, ambos algoritmos generan interpolaciones o extrapolaciones hacia atrás de las series (esta última característica puede ser útil cuando interesa reconstruir la señal hacia el pasado). Finalmente, la formulación SS de la ecuación (5.44) es tan general que permite la extensión de gran cantidad de modelos estándar a versiones equivalentes con parámetros cambiantes.

5.5.2 Estimación de los Hiper-Parámetros

La aplicación de los algoritmos recursivos FK/FIS requiere del conocimiento de todas las matrices del sistema, es decir, $\Phi_t, \Gamma_t, \mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t, \mathbf{D}_t, \mathbf{C}_t, \mathbf{Q}_t$ y \mathbf{R}_t . La mayoría de los elementos de estas matrices son conocidos en muchas aplicaciones, pero siempre hay un número de ellos que no se conocen (llamados, en ciertos contextos, hiper-parámetros) y deben ser estimado por métodos eficientes.

La estimación del problema se puede llevar a cabo de distintas maneras, pero la máxima verosimilitud (Maximum Likelihood, ML) en el dominio del tiempo vía “la descomposición del error” [20] y [33] es la más común debido a su generalidad y buenas propiedades teóricas.

No obstante, existe toda una batería de métodos alternativos que producen soluciones muy buenas, e incluso superan ML, en determinados contextos concretos. Algunos de estos métodos son: (i) ML en el dominio de la frecuencia ([20], Pág. 191-204), que se consigue mediante el uso de la Transformada de Fourier aplicada al método en el dominio del tiempo; (ii) otros métodos en el dominio de la frecuencia [39]; (iii) optimización de el error de predicción uno o varios periodos hacia adelante; (iv) combinaciones de los métodos anteriores [37]; (v)

aproximaciones Bayesianas [36]; y (vi) métodos de estimación basados en la forma reducida de ARIMA (solamente aplicables a modelos UC univariantes, [21] y [28])

5.5.3 Modelo empleado

Para los datos de los experimentos incluidos en el presente capítulo, el modelo considerado es probablemente una de las formas más simples que puede adoptar la ecuación (5.43), ya que los componentes que se observan en la Figura 5.12 son tan sólo la tendencia y el irregular para ambas series o, en otras palabras, la estructura del modelo puede ser la típica en ingeniería, dada por una señal más ruido. Las tendencias (o señal) deben ser consideradas como una estimación de la media local de las series que se pretende estudiar en su estado futuro, mientras que el las irregulares son un conjunto de perturbaciones impredecibles superpuestas a tales tendencias. De esta forma, el modelo vendrá dado por la ecuación (5.44).

$$\mathbf{z}_t = \text{señal} + \text{ruido} = \mathbf{T}_t + \mathbf{v}_t \quad (5.45)$$

Uno de los modelos que normalmente se emplea para la estimación de la media local es el modelo conocido como Paseo Aleatorio Integrado bivalente (Integrated Random Walk, RW) dado por la ecuación (5.46).

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t &= \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix} \mathbf{x}_{t-1} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{1t} \\ w_{2t} \end{pmatrix} \\ \mathbf{z}_t &= (\mathbf{I} \quad \mathbf{0}) \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_{w_1}^2 & \rho \sqrt{\sigma_{w_1}^2 \sigma_{w_2}^2} \\ \rho \sqrt{\sigma_{w_1}^2 \sigma_{w_2}^2} & \sigma_{w_2}^2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sigma_{v_1}^2 & \sigma_{v_1 v_2} \\ \sigma_{v_1 v_2} & \sigma_{v_2}^2 \end{pmatrix}$$

donde todas las matrices del sistema son invariantes en el tiempo en referencia al modelo general de la ecuación (5.44); \mathbf{I} es una matriz identidad de dimensión 2×2 ; $\mathbf{0}$ es una matriz de ceros de dimensión 2×2 ; σ_{\bullet}^2 es la varianza de los ruidos o perturbaciones en las ecuaciones de estado o de medida; $\sigma_{\bullet\bullet}$ es la covarianza entre dos perturbaciones; y ρ es el coeficiente de correlación entre los dos ruidos de la ecuación de estado.

Los hiper-parámetros desconocidos en este modelo son \mathbf{Q} y \mathbf{R} . Hay que tener en cuenta que \mathbf{Q} está parametrizado de la forma mostrada anteriormente con el fin de que aparezca explícitamente el coeficiente de correlación entre las perturbaciones de las ecuaciones de estado tercera y cuarta. Además, se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones para interpretar correctamente el modelo (5.46):

- La ecuación de observación implica que las series están compuestas de una media local (tendencia) y una perturbación (o bien señal más ruido).
- Los primeros dos estados en el modelo son el valor de la media local (o tendencias) de cada serie. Es decir, son las señales libres de ruido correspondiente a cada una de las dos salidas. Los estados tercero y cuarto son precisamente la pendiente de dichas señales libres de ruido.
- Dada la estructura del modelo es fácil observar que los estados tercero y cuarto son las pendientes de cada tendencia. Las tendencias son modeladas, en el caso que se está considerando, como estocásticas y, por tanto, variables en el tiempo en función de la varianza de las perturbaciones del estado.
- Si el coeficiente de correlación ρ es 1 ambas tendencias son proporcionales, lo cual indica que el comportamiento dinámico de ambas tendencias es igual.
- Por definición, σ_{ϵ}^2 es positiva; $-1 \leq \rho \leq 1$; y \mathbf{R} debe ser definida positiva. La estimación de estos parámetros, por tanto, debe realizarse con algoritmos de búsqueda que incorporen dichas restricciones, o bien estimar ciertas transformaciones de dichos parámetros (normalmente llamados “scores”) de forma que al deshacer la transformación se obtengan valores para que cumplen las restricciones.
- Las distribuciones asintóticas de los estimadores de ML son gaussianas si todas las perturbaciones en el modelo (5.46) son gaussianas. De este modo, ya que ρ es estimado explícitamente, se pueden obtener intervalos de confianza y test estadísticos de hipótesis para este parámetro de forma sencilla.

El parámetro clave en el modelo es ρ . Este parámetro se propone para identificar las curvas que representan un fallo y las que no (ver siguiente sección). Dos curvas se considera que se comportan igual cuando se puede decir que estadísticamente $\rho = 1$.

La estrategia a seguir en el modelo descrito anteriormente puede usarse para el reconocimiento de la similitud que existe entre la curva de referencia y una nueva curva a analizar mediante el valor del parámetro ρ una vez que se tienen las curvas completas (situación “off-line”). O bien se puede aplicar en situaciones en las que todos los parámetros se van actualizando a medida que se va incorporando la información (situación “on-line”). En este último caso se obtiene una serie temporal estimada para ρ (con bandas de confianza), y de esta forma se puede minimizar el tiempo necesario para detectar el fallo a medida que se está generando. Incluso la predicción de la curva actual puede conseguirse en cualquier instante de tiempo, sobre la base de los valores actuales de los parámetros y de los futuras observaciones de la curva de referencia.

Una última puntualización a tener en cuenta, como en la mayoría de los análisis de series temporales, es el problema de la inicialización del FK. La solución más sencilla y bastante habitual para resolver este problema es utilizar un *a priori* difusa. Existen soluciones más teóricas, entre las que destaca el empleo de la *función de verosimilitud exacta*. Esta aproximación puede ser útiles en series temporales cortas, aunque las ganancias con series más largas no es tan clara [4] y [5].

5.5.4 Resultados experimentales

A continuación se muestran los resultados para el modelo definido en las secciones anteriores aplicado a los experimentos descritos anteriormente en una situación “off-line”. La clasificación de la curva, que represente o no un fallo del mecanismo, puede realizarse de varias formas. Una primera está basada sólo en el valor numérico estimado del parámetro ρ , en donde un valor por debajo de un nivel que se considere aceptable será indicativo de que dicha curva corresponde a un fallo en el mecanismo. Una segunda aproximación consiste en considerar los intervalos de confianza de la estimación. Por ejemplo, si se elige un nivel de confianza del 95 % la curva se considera que no presenta ningún fallo en el mecanismo si el límite superior del nivel de confianza es de un valor de 1 o muy próximo a éste.

En el sentido normal del movimiento de las agujas, considerando el valor de $\rho = 0.98$ como el mínimo aceptable según la primera aproximación, es posible detectar el 100 % de los fallos considerados y el 80 % de los casos en los que no existe fallo (sobre el 98.73 % de los casos totales).

El comportamiento del modelo es adecuado, puesto que genera dos grupos bien diferenciados de curvas, ya que el mayor valor de ρ para curvas con fallos fue de 0.85 y su intervalo de confianza al nivel de confianza del 95% fue de (0.66, 0.93), mientras que el menor valor de ρ para curvas sin ningún fallo del mecanismo fue de 0.99 con un intervalo de confianza de (0.95, 1).

En el sentido inverso del movimiento de las agujas, con el mismo valor crítico de $\rho = 0.98$, se detectó el 100 % de los fallo y el 75 % de los casos que no presentan fallo (98.61 % del total de los casos). El mayor valor de ρ para curvas con algún fallo fue de 0.95 y su intervalo de confianza a un nivel del 95 % es de (0.88, 0.98), mientras que el menor valor de ρ para las curvas que no presentaban ningún fallo fue de 0.95, y su intervalo de confianza a un nivel de 0.997 de (0.99, 0.9992).

Quizá la mayor ventaja del modelo y de las técnicas recursivas descritas anteriormente en el marco de SS son en aplicaciones “on-line”. Una característica importante ya mencionada es

que permite la posibilidad de detectar fallos basado en la propiedad de predicción del modelo (técnica muy empleada en mantenimiento predictivo).

En la Figura 5.26 se muestran dos casos de predicción empleando la misma curva de referencia pero con diferentes curvas que están siendo analizadas

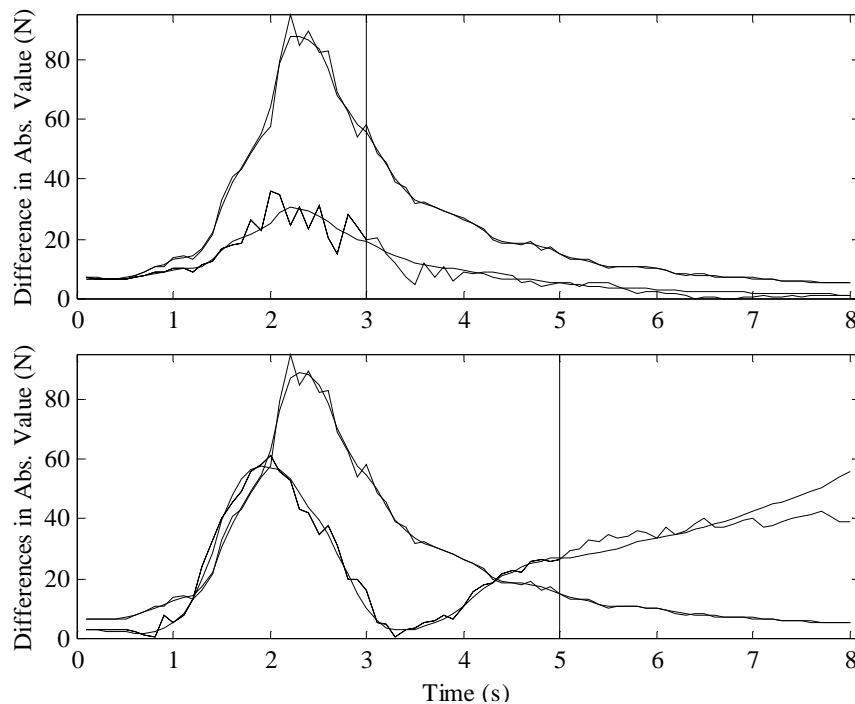


Figura 5.26.- Dos ejemplos de predicciones basadas en el modelo (5.46) con diferentes orígenes de predicción. En la curva superior no existe ningún fallo, en la curva inferior sí. Los orígenes de predicción en ambos casos se han marcado con una línea vertical [31].

En ambos casos, la información disponible es la curva de referencia para todo el intervalo de tiempo considerado (basadas en previas curvas tomadas del sistema) junto con la información correspondiente a cada curva hasta el origen de la predicción (línea vertical). El objetivo es conseguir la predicción para el estado del sistema basada en la información empleada en el modelo (5.46). Es obvio que estas predicciones, y por tanto la posibilidad de detectar fallos antes de que se produzcan, dependen crucialmente del factor estimado ρ , ya que este parámetro es el que determina la aproximación de las predicciones a la curva de referencia. Valores cercanos a 1 implican que la forma de la curva está próxima a la de referencia y, por tanto, de tener una probabilidad muy pequeña de que sea representativa de un fallo en el mecanismo. En esta situación “on-line”, los parámetros y las predicciones son actualizadas en cada instante de tiempo, obteniéndose con ello una nueva curva de referencia.

Además de lo comentado anteriormente, las estimaciones de ρ son un buen indicativo de la aparición de un fallo. En la Figura 5.27 se muestran la estimación recursiva de este parámetro con sus intervalos de confianza al 95 % para una curva representativa de un estado de mecanismo sin fallo (parte superior) y una correspondiente a un fallo (parte inferior). Los valores estimados de este parámetro indican claramente que la curva superior no presenta ningún fallo (los valores de ρ siempre están próximos a uno), mientras que la segunda, en los primeros instantes no existe fallo en el sistema, aunque a medida que transcurre el tiempo se aprecia la aparición de un fallo, ya que el valor de ρ va decreciendo.

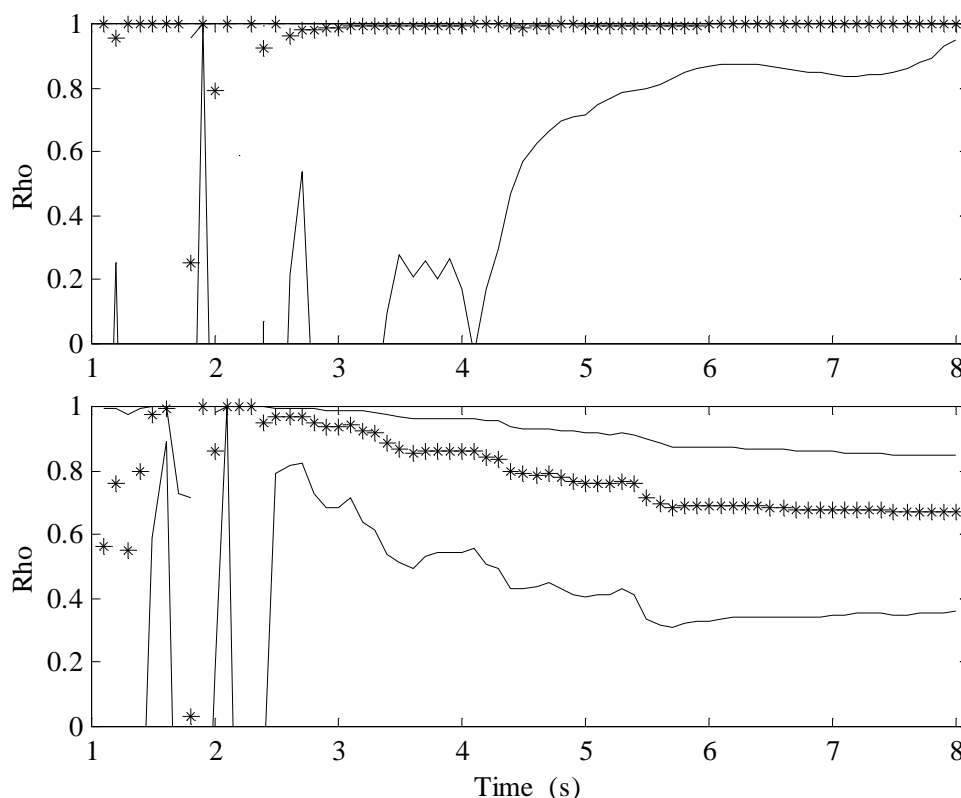


Figura 5.27.- Estimación recursiva de ρ (asterisco) y banda de confianza al 95 % (continua) para una curva sin fallo (superior) y otra con fallo (inferior) [31].

Las bandas de confianza proporcionan la siguiente información adicional. En ambos casos la confianza en los estados tiende a aumentar a medida que se obtiene mayor información de los datos de la curva. En cambio, este análisis está limitado por el hecho de que se precisan de los datos correspondientes de al menos dos segundos para poder obtener una estimación razonable del parámetro y eliminar los cálculos erróneos que se cometían al comienzo del caso expuesto anteriormente.

El algoritmo puede completarse de distintas formas, dos de las cuales han sido tratadas. La primera de ellas, dado el hecho de que no todos los fallos tienen la misma importancia, se basa en una búsqueda más detallada centrada en el modelo (5.46) con el fin de detectar mayor cantidad de fallos. De la misma manera, distintas curvas de referencia pueden tener formas diferentes, siendo esta causa la principal razón por la que algunas curvas que no representan ningún fallo en el sistema no son detectadas como tal empleando el modelo (5.46). Así pues, sería necesario desarrollar un algoritmo más completo para evitar este efecto.

La segunda, siendo ésta una extensión del trabajo más teórico y que no ha sido considerada debido a los buenos resultados que se han obtenido, es la búsqueda formal de distintos aspectos estadísticos del modelo, siendo el más importante el desarrollar formalmente un test de hipótesis estadístico para el parámetro ρ (si el valor de éste es igual o menor que uno), así como del resto de los parámetros.

Referencias

- [1] Balfour Beatty Rail. <http://www.balfourbeatty.com>
- [2] Bryson, A.E. and Ho, Y.C., 1969. *Applied Optimal Control, Optimization, Estimation and Control*, Waltham, Mass.: Blaisdell Publishing Company.
- [3] Casals J., Jerez, M. and Sotoca S., 2000. *Exact Smoothing for stationary and non-stationary time series*, *International Journal of Forecasting*, 16 , pp. 59-69.
- [4] de Jong, P., 1988. *The Likelihood for a State Space Model*, *Biometrika*, 75, (1) pp. 165-169.
- [5] de Jong, P., 1991. *Stable algorithms for the state space model*, *Journal of Time Series Analysis*, 12, (2)(1991) 143-157.
- [6] Durbin, J. and Koopman, S.J., 2001. *Time Series Analysis by State Space Methods*, Oxford University Press, Oxford, 2001.
- [7] Fararooy, S. and Allan, J., 1995. *Condition-Based Maintenance of Railway Signalling Equipment*, *Electric Railway in a United Europe*. Railink'95, IEE Conf. Pub. 405, pp. 33-37.
- [8] **García Márquez, F. P.**, Schmid, F. and Conde J. *Wear Assessment Employing Remote Condition Monitoring: A Case Study*. *Wear of Materials*, Washington DC, EEUU, del 30 de marzo al 3 de Abril de 2003, ref. [O201].
- [9] **García Márquez, F.P.** , Schmid, F. and Conde J. *RCM² Aplicado a Sistemas Automáticos de Accionamiento de Agujas en Vías de Alta Velocidad*. "Mantenimiento. Ingeniería Industrial y de Edificios", nº 167 Septiembre, 2003, pp. 20-26, en prensa.
- [10] **García Márquez, F.P.** y Laguna, M. *Optimización: Conceptos Básicos y Tendencias Actuales*. AconteSer, editada por Dimexa, Diciembre 2001, Año V Número 9, pp. 24-25.
- [11] **García Márquez, F.P.**, Pedregal Tercero, D.J., and Schmid, F. *Inversiones en el Sector del Transporte Ferroviario en la UE y su Influencia en el Mercado de los Desvíos Ferroviarios*, "Investigaciones Económicas", en revisión.
- [12] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *A Reliability Centered Approach to Remote Condition Monitoring. A Railway Points Case Study*. "Reliability Engineering and System Safety", Volume/Issue 80/1, pp. 33-40, 2003.
- [13] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *A Theoretical Model for Detecting Faults in Point Mechanisms Employing Kalman Filter*. "Operation Research", en revisión.
- [14] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *El Filtro de Kalman como Herramienta de Mejora de la Seguridad y Fiabilidad del Transporte Ferroviario*. "Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica", en revisión.
- [15] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Kalman Filter Approach for Increasing the Reliability and Safety to Remote Condition Monitoring. A Case Study*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering. Part. F. Journal of Rail and Rapid Transit*, en revisión.

- [16] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Management of Railway Infrastructure Maintenance. A case Study on Condition Monitoring of Point Mechanisms*. "Transportation Science", en revisión.
- [17] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad y Monitorización Remota Basada en la Condición, RCM²: Un caso de Estudio*, "Ingeniería y Gestión de Mantenimiento", nº 26 Noviembre/Diciembre, 2002, pp. 35-41.
- [18] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Modelo de Detección de Fallos Empleado en la Monitorización Remota Basada en la Condición*. "Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica", en prensa.
- [19] **García Márquez, F.P.**, Schmid, F. and Conde J. *Wear Assessment Employing Remote Condition Monitoring: A Case Study*. "Wear", nº 255, 2003, pp. 1209-1220.
- [20] Harvey, A.C., 1989. *Forecasting Structural Time Series Models and the Kalman Filter*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [21] Hillmer, S.C., Bell, W.R. and Tiao, G.C., 1983. *Modelling Considerations in the Seasonal Adjustment of Economic Time Series*, in A. Zellner (ed.), *Applied Time Series Analysis of Economic Data*, Washington D.C.: US Dept. of Commerce-Bureau of the Census, pp. 74-100.
- [22] Jacobs, O.L.R. 1993. *Introduction to Control Theory*, 2nd Edition, Oxford University Press.
- [23] Julier, S.J., and Uhlmann, J.K. 1995. *A General Method of Approximating Nonlinear Transformations of Probability Distributions*, Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- [24] Julier, S.J., Uhlmann, J.K, and Durrant-Whyte, H.F. 1995. *A New Approach for Filtering Nonlinear Systems*, Proceedings of the 1995 American Control Conference, Seattle, Washington, pp. 1628-1623.
- [25] Kalman, R.E., 1960. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering, pp. 35-45.
- [26] Kalman, R.E., 1960. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, ASME Trans., Journal Basic Eng., 83-D pp. 95-108.
- [27] Koopman, S.J., 1993. *Disturbance Smoother for State-Space Models*, Biometrika, 76 pp. 65-79.
- [28] Maravall, A. and Gómez, V., 1998. *Programs TRAMO and SEATS, Instructions for the User* (Beta Version: June 1998). Madrid: Bank of Spain.
- [29] Mirabadi, A., Sandidzadeh, M.A., Schmid F. Presented by **García Márquez, F.P.** *Fault Tolerant Train Navigation Systems by Means of Integration of GPS, Balises, Tachometers And Doppler Radar*, Washington DC, EEUU, 23 de septiembre de 2002, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.
- [30] Moubray, J., 1997, *Reliability Centred Maintenance (RCM-II)*, Butterworth Heinemann, Oxford.

- [31] Pedregal Tercero, D.J., **García Márquez, F. P.** , Schmid, F. *RCM² Predictive Maintenance Of Railway Systems Based on Unobserved Components Models*. "Reliability Engineering and System Safety", Vol. 83, Num. 1, pp. 103-110.
- [32] Pedregal, D.J. and Young P.C., 2002. Statistical Approaches to Modelling and Forecasting Time Series. In Clements, M., Hendry, D. (eds.), *Companion to Economic Forecasting*, Blackwell Publishers.
- [33] Schweppe, F., 1965. Evaluation of Likelihood Function for Gaussian Signals, I.E.E.E. Trans. on Inf. Theory, 11 pp. 61-70.
- [34] Shimonae, T., Kawakami, T., Miki, H., Matsuda, O., and Tekeuchi, H. *Development of a monitoring system for electric point machines*. IRSE Aspect Int. Conf. 1991: 395-401.
- [35] The University of Sheffield. <http://www.shef.ac.uk>
- [36] West, M. and Harrison, J., 1989. *Bayesian Forecasting and Dynamic Models*, New York: Springer-Verlag.
- [37] Young, P.C. and Pedregal, D.J., 1998. *A New Adaptive Approach to Forecasting Electricity Demand (II)*, Centre for Research on Environmental Systems and Statistics, Lancaster University, Technical Note No. 155.
- [38] Young, P.C., 1984 *Recursive Estimation and Time-Series Analysis*, Berlin: Springer-Verlag.
- [39] Young, P.C., Pedregal D.J. and Tych W., 1999. *Dynamic harmonic regression*, Journal of Forecasting, 18, 369-394.

Anexo I. Nomenclatura

d^k	Señal representativa del estado del mecanismo.
d^i	Actual curva de referencia.
d^{i-1}	Anterior curva de referencia.
d^j	Nueva curva que representa un estado del sistema que no contiene ningún fallo.
E	Esperanza matemática.
$\tilde{\mathbf{e}}_x$	Error de predicción.
$\tilde{\mathbf{e}}_z$	Residuo de medida.
$\bar{\mathbf{e}}$	Media del vector \mathbf{e} .
\mathbf{e}_k	Error estimado a posteriori.
h	Ecuación que relaciona la medida con la variable de proceso.
\mathbf{K}	Factor de ganancia del filtro de Kalman.
\mathbf{P}	Covarianza de $\hat{\mathbf{x}}$.
\mathbf{Q}	Matriz de covarianzas de \mathbf{w} .
\mathbf{R}	Matriz de covarianzas de \mathbf{v} .
s	Varianza
t	Tiempo actual.
T	Tiempo total.
t_{max}	Tiempo donde se da el máximo de la curva.
Δt	Margen de tiempo.
\mathbf{u}	Vector de entradas.
\mathbf{v}	Ruido correspondiente a la medida.
\mathbf{w}	Ruido correspondiente a \mathbf{x} .
\mathbf{x}	Vector de estado.
x^k	Señal que está siendo medida.
x^j	Señal de referencia.
$\tilde{\mathbf{x}}$	Aproximación considerada del vector de estado.
$\hat{\mathbf{x}}$	Estimador del vector de estado.
$\hat{\mathbf{x}}$	Estimador del estado a posteriori del proceso.

\mathbf{z}	Media.
$\tilde{\mathbf{z}}$	Aproximación considerada del vector de medida.
δ	Función delta de Kronecker.

Anexo II. Sensores empleados en los experimentos

A2.1 Sensor de aguja

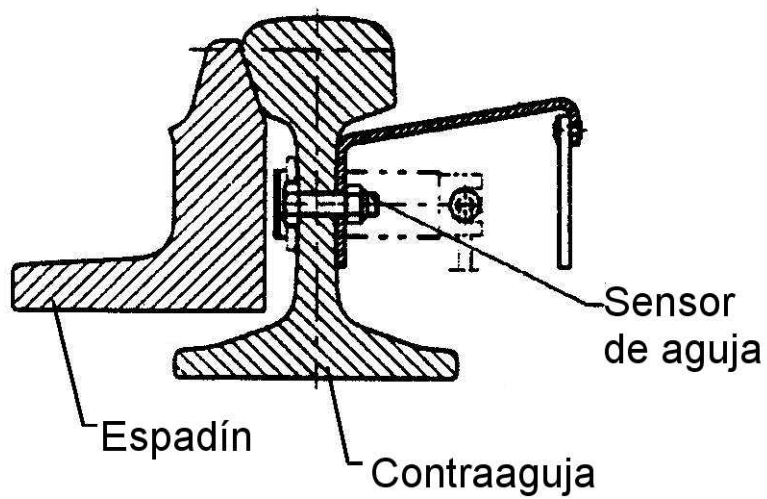


Figura A2.1.- Sensor de aguja

A2.2 Sensor de punta de aguja

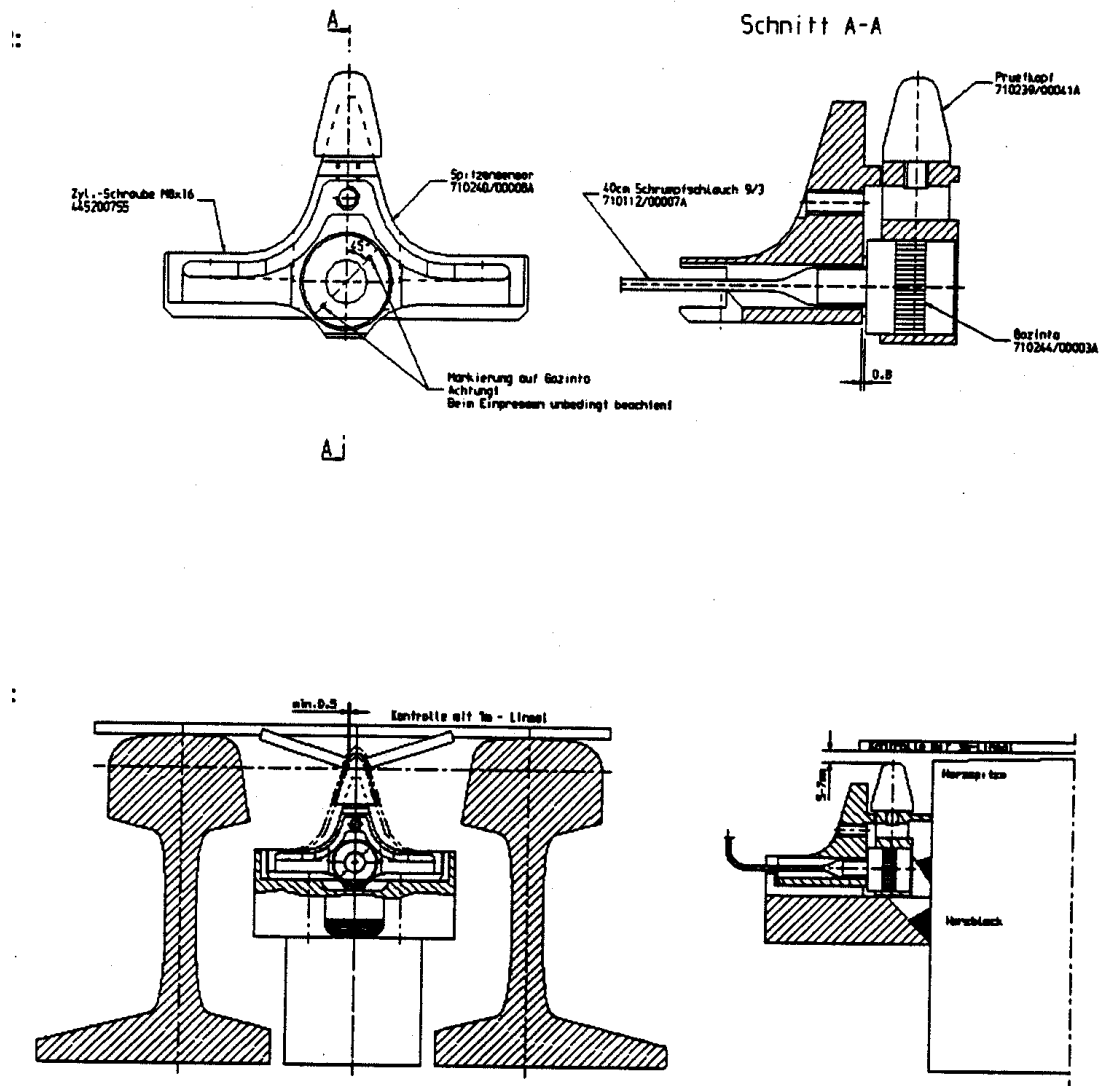


Figura A2.2.- Sensor de punta de aguja

A2.3 Sensor de fuerza del carril

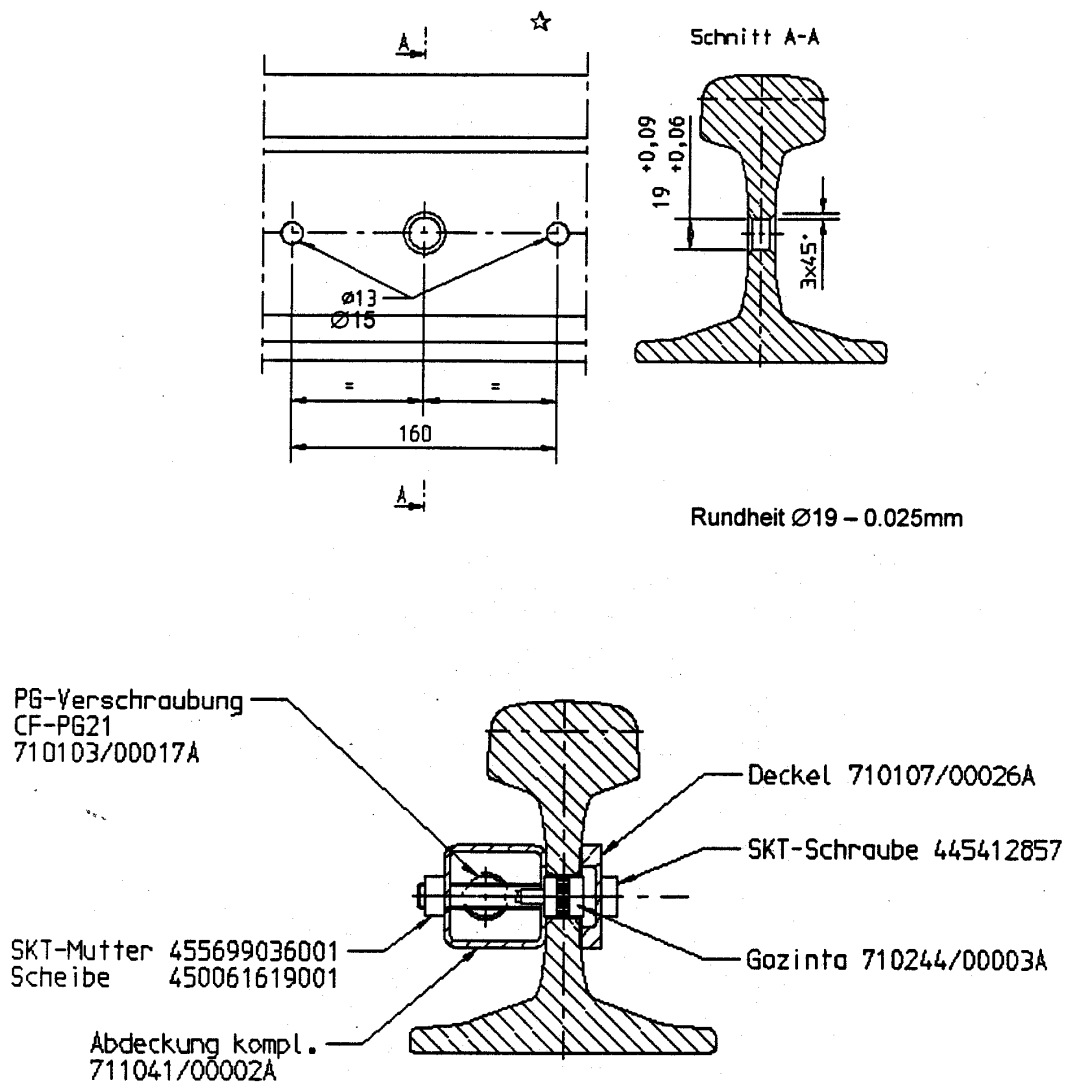


Figura A2.3.- Sensor de fuerza del carril

A2.4 Sensor de temperatura del carril

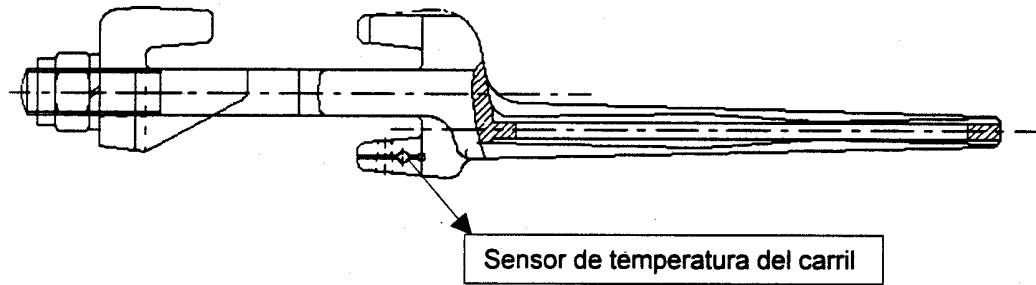


Figura A2.4.- Sensor de temperatura del carril.

A2.5 Sensor de entrecalle

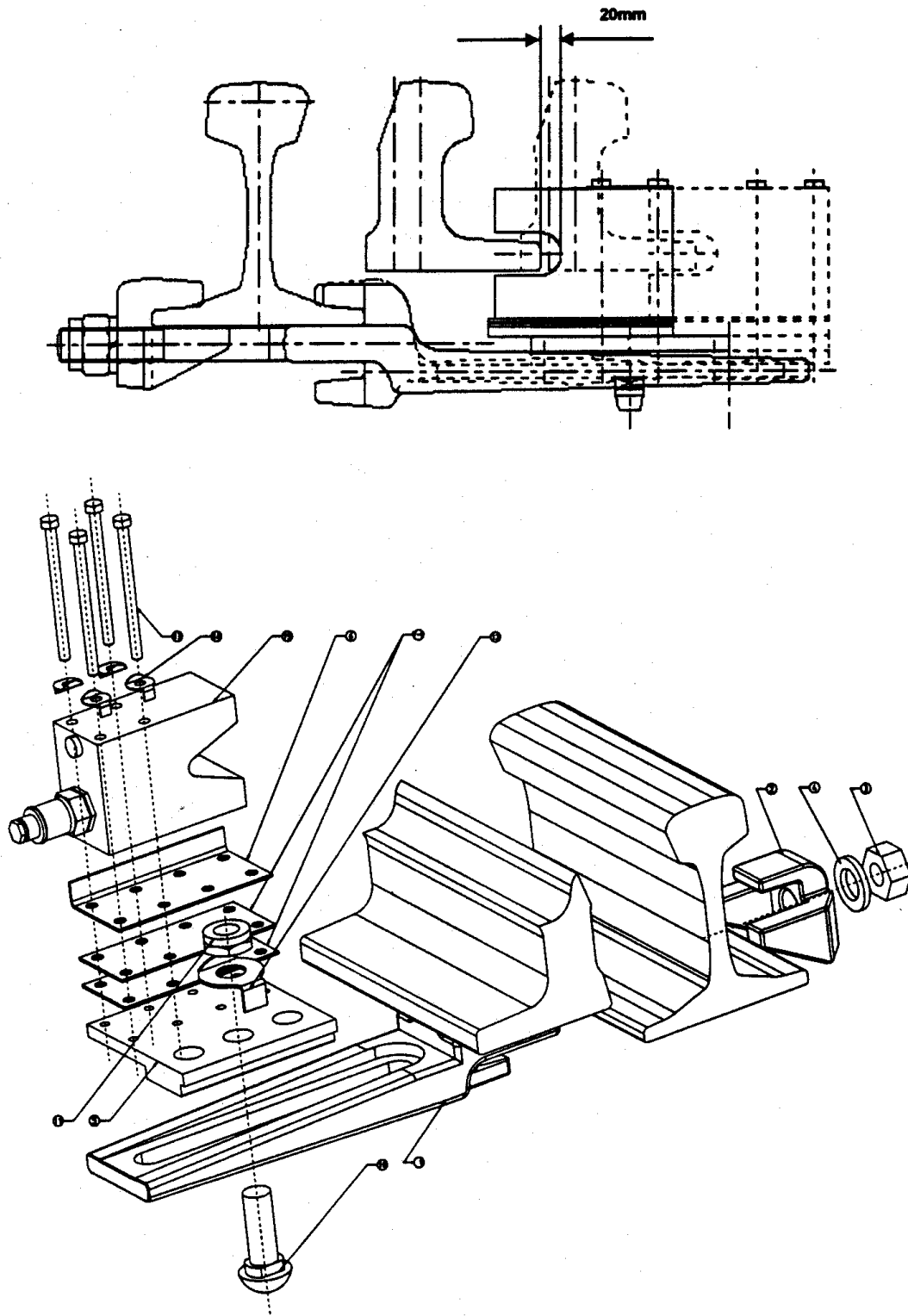


Figura A2.5.- Sensor de entrecalle

Anexo III. Análisis de fallos¹

A3.1 Vibration

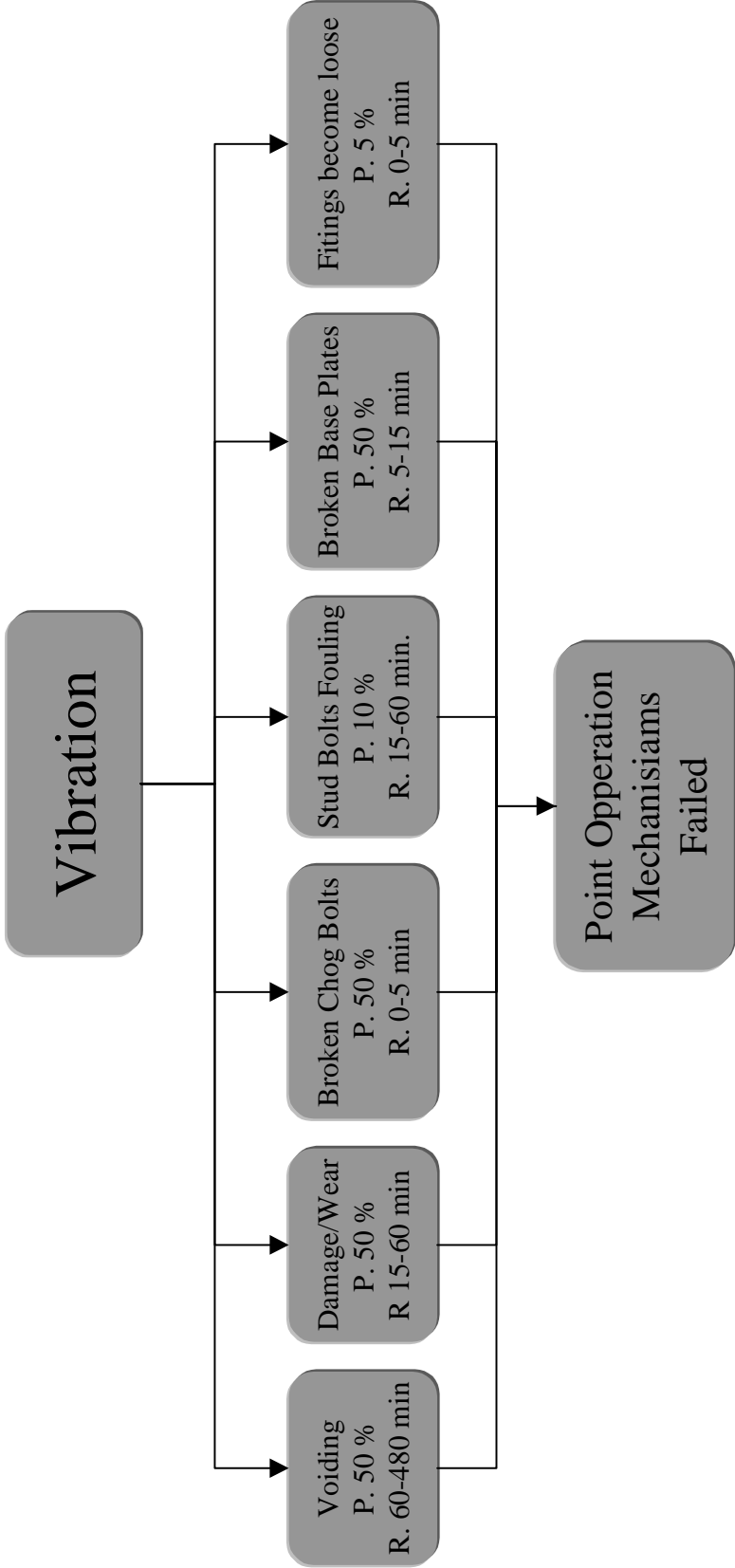


Figura A3.1.- Vibration

¹ Estos diagramas fueron desarrollados por las Universidades de Castilla-La Mancha (España) y de Sheffield (Inglaterra) en la empresa inglesa Balfour Beatty Rail. En ellas, P representa la prioridad en % y R el riesgo en min.

A3.2 P-Way Working Alone

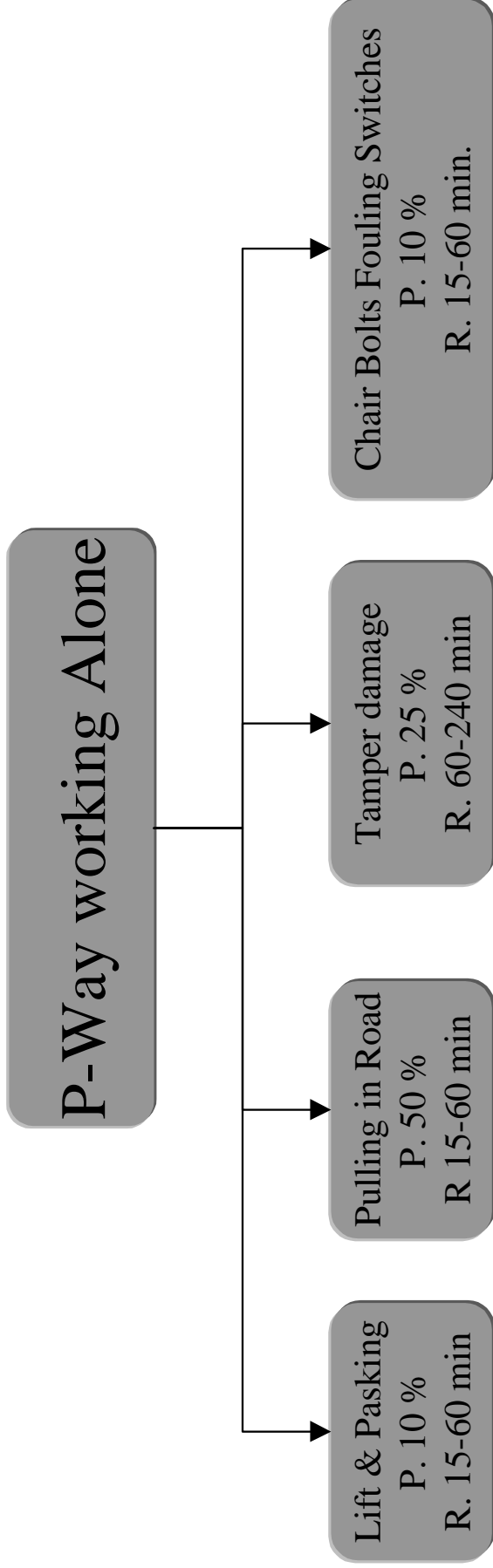


Figura A3.2.- P-Way Working Alone

A3.3 Track Geometry

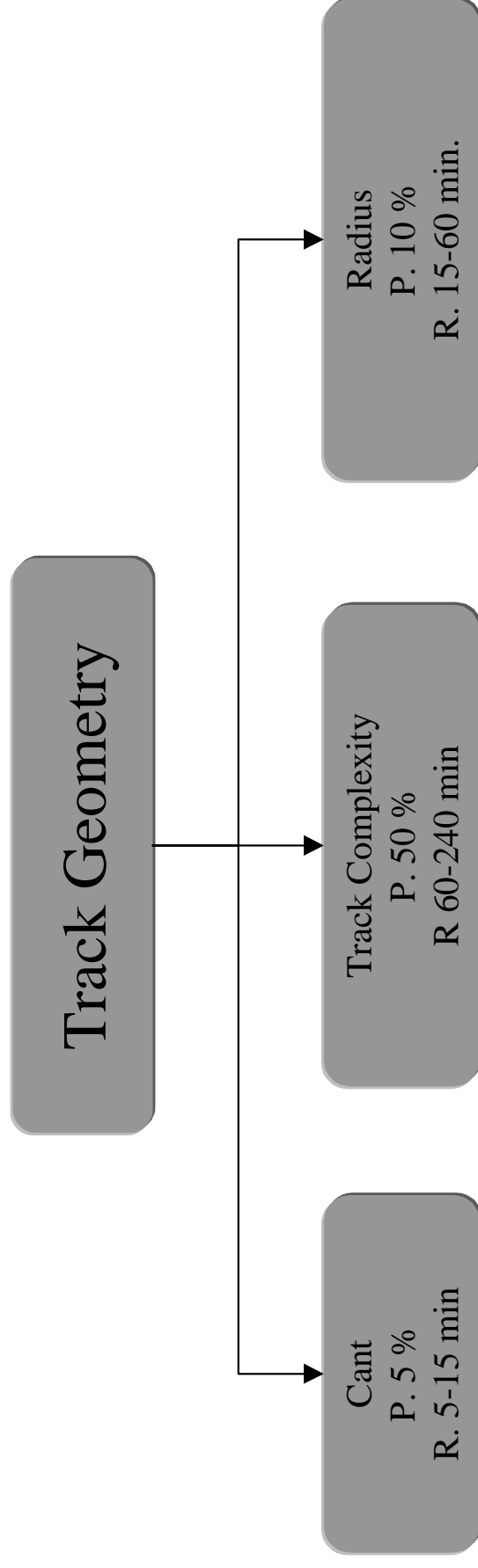


Figura A3.3.- Track Geometry

A3.4 Condition of Track

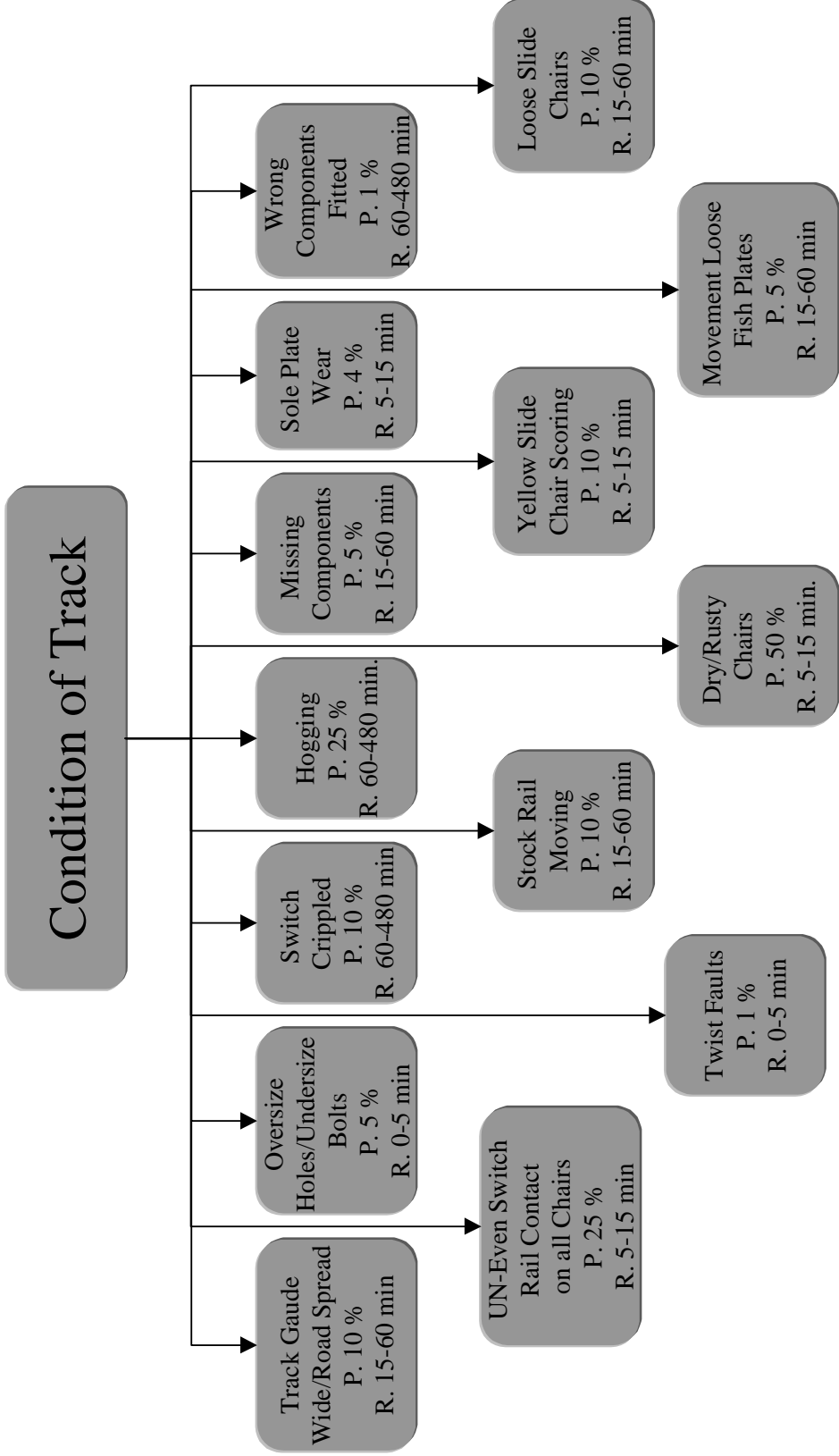


Figura A3.4.- Condition of Track

A3.5 Environment

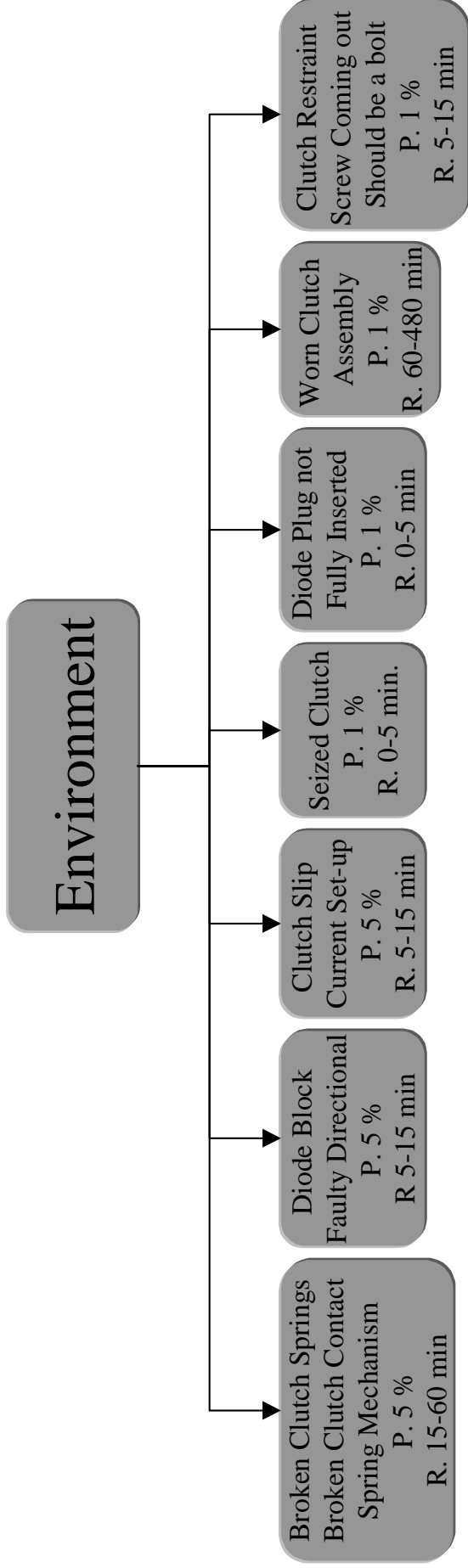


Figura A3.5.- Environment

A3.6 HW Drive

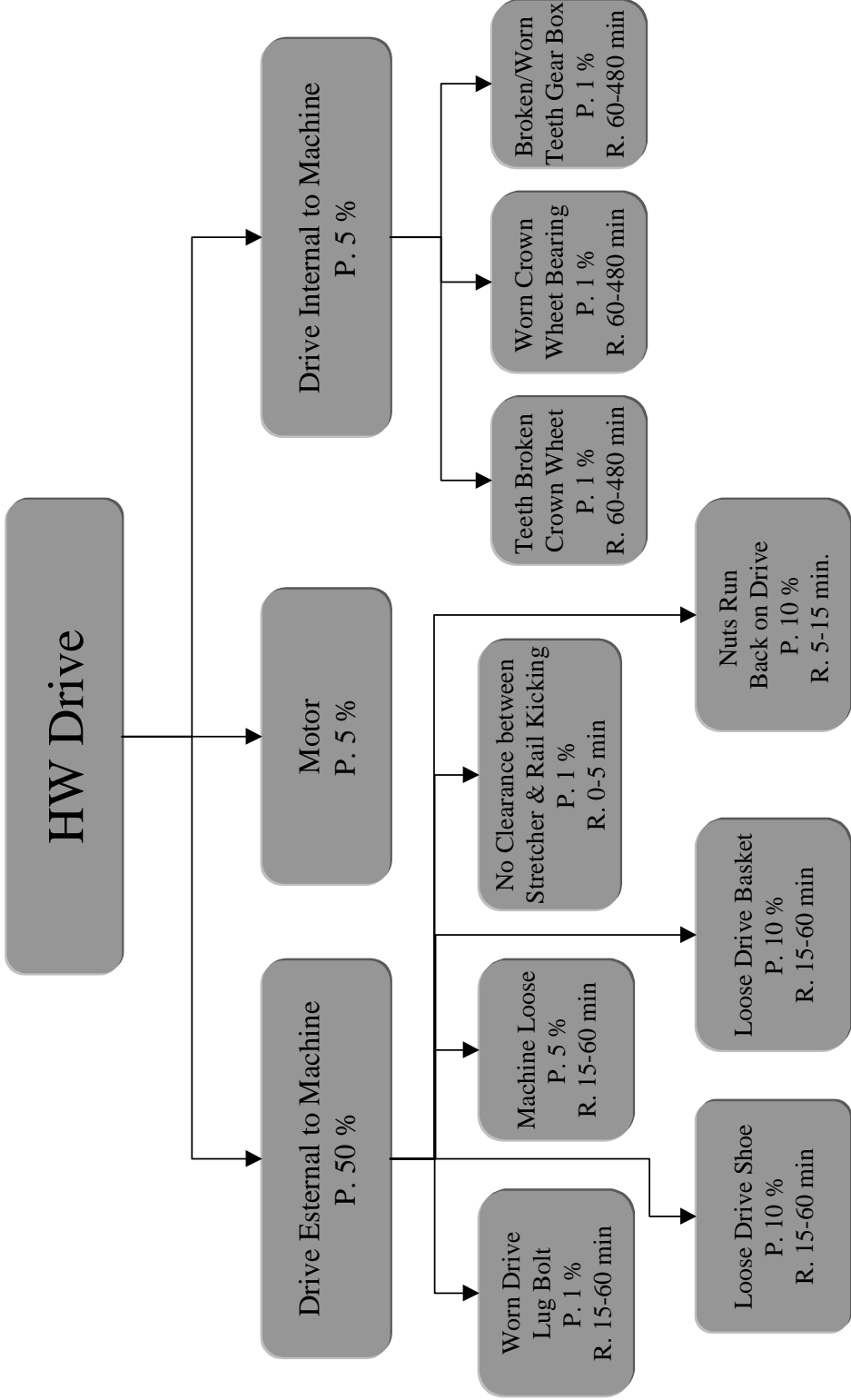


Figura A3.6.- HW Drive

A3.7 Motor

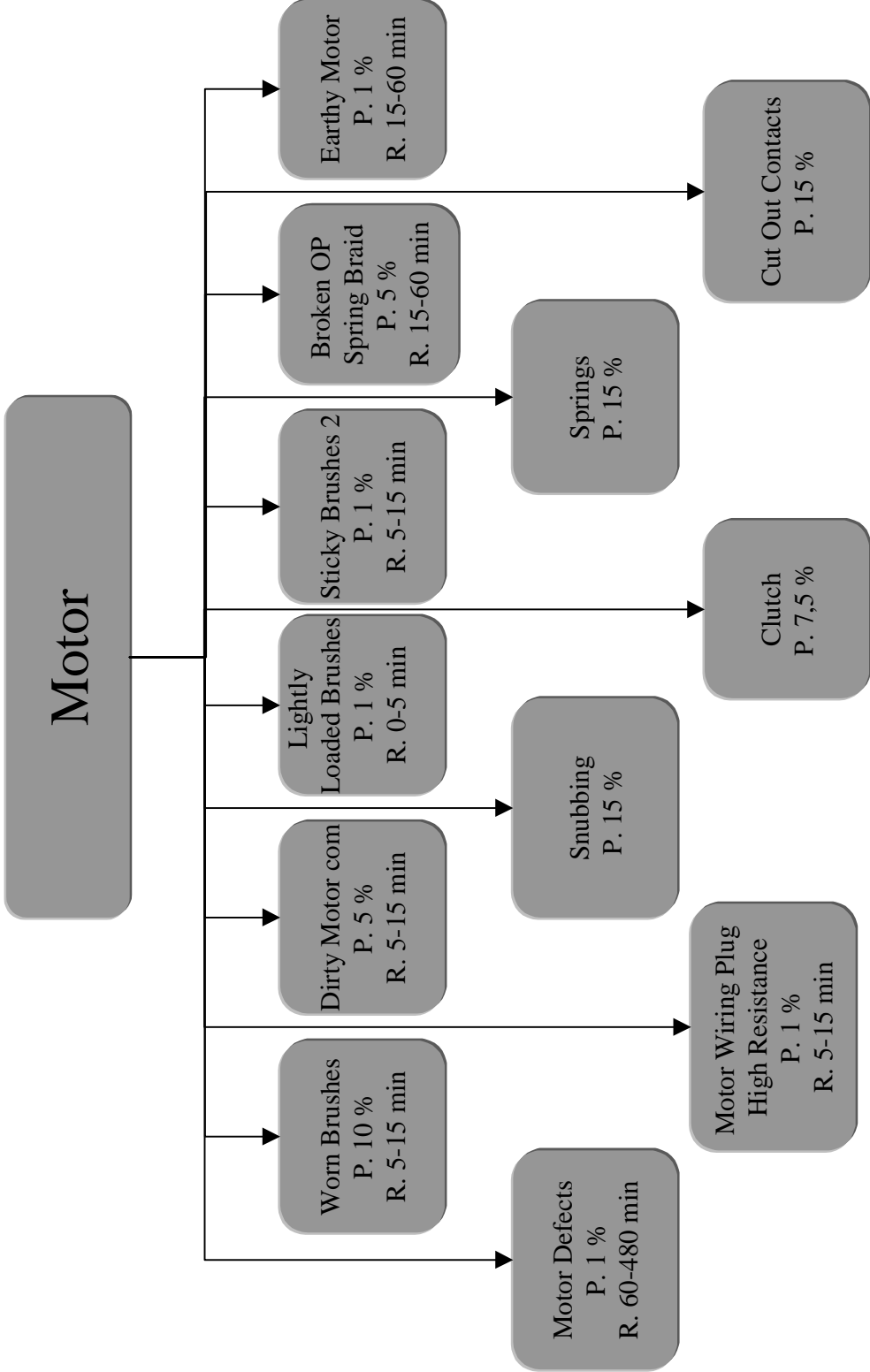


Figura A3.7.- Motor

A3.8 Springs

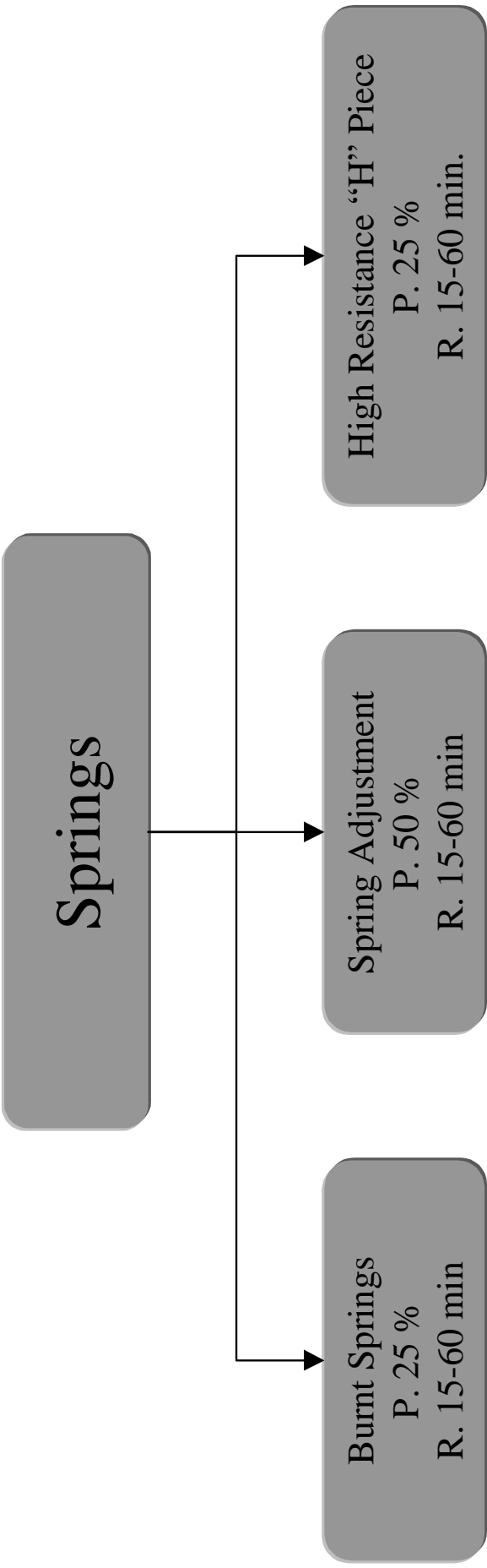


Figura A3.8.- Springs

A3.9 Track Geometry

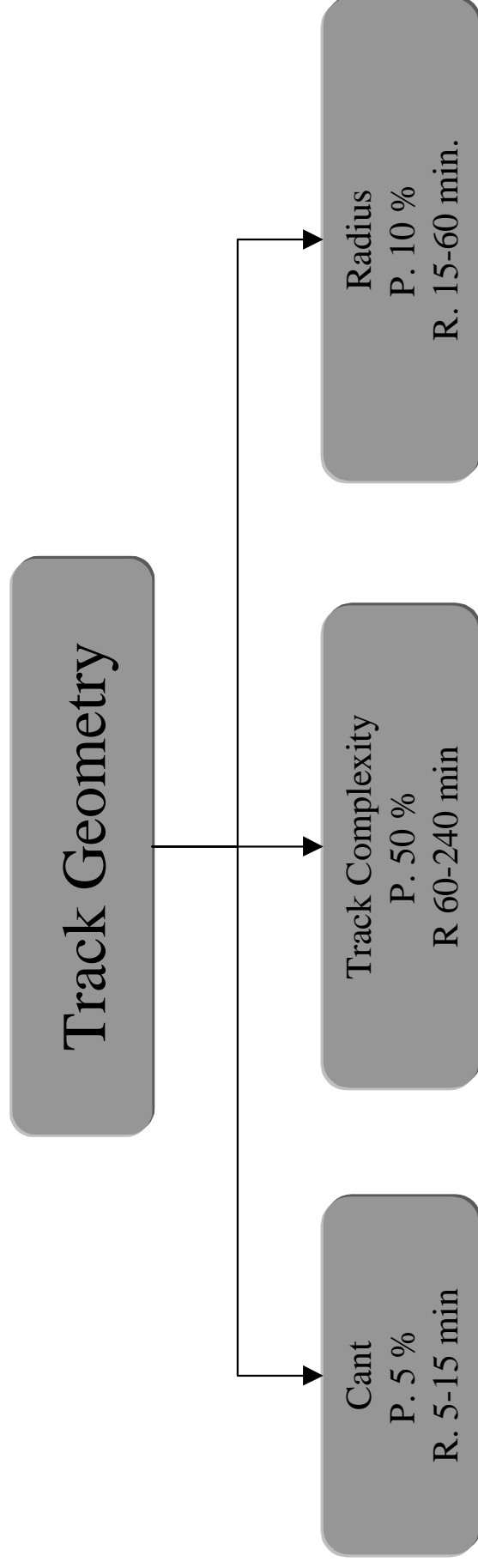


Figura A3.9.- Track Geometry

A3.10 HW Lock

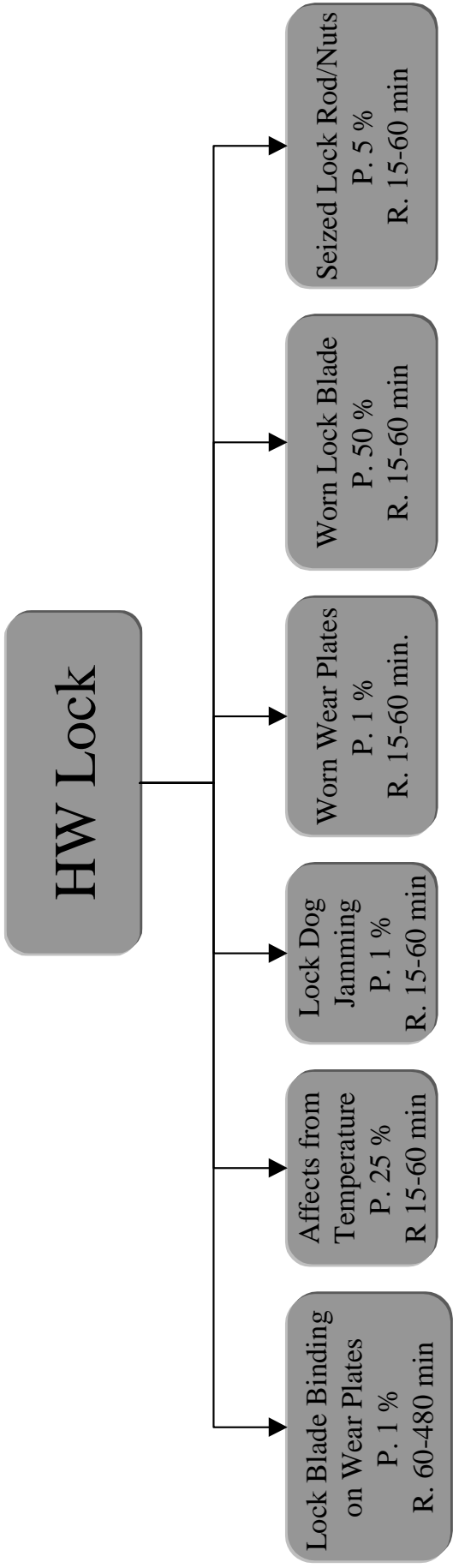


Figura A3.10.- HW Lock

A3.11 Snubbing

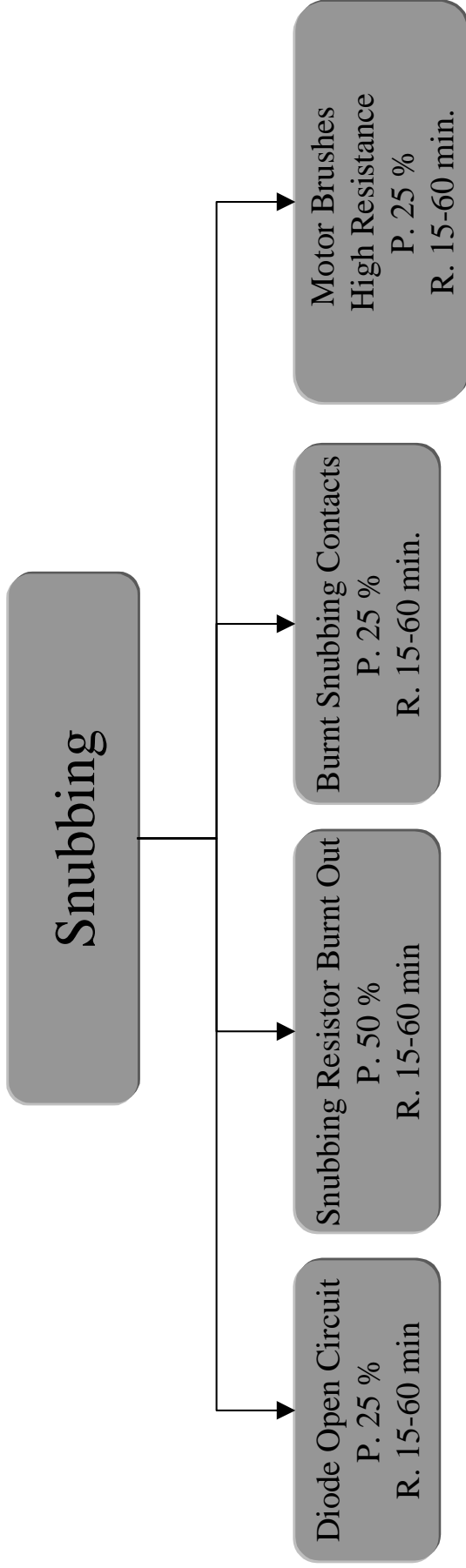


Figura A3.11.- Snubbing

A3.12 Supplementary Detector

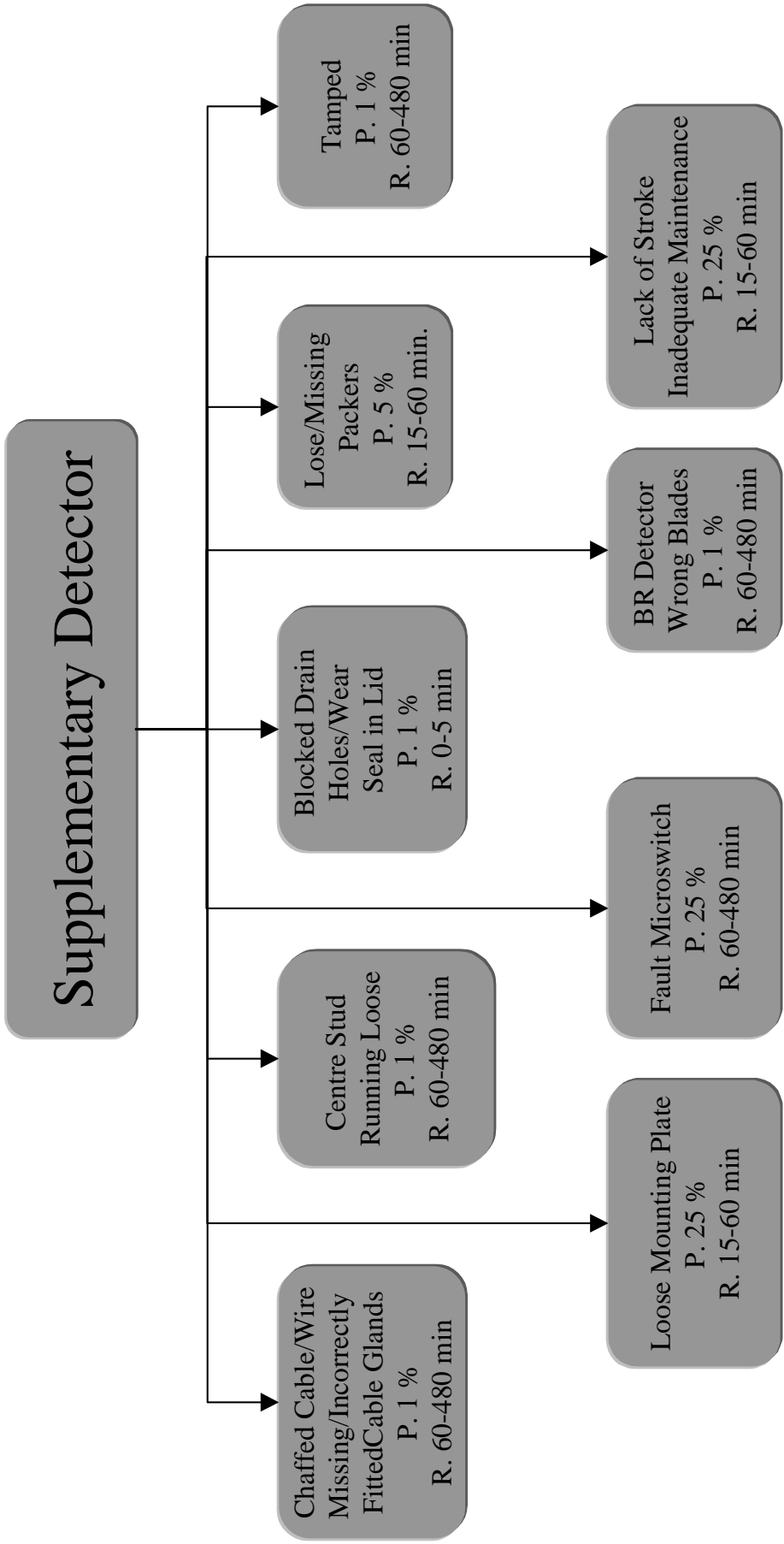


Figura A3.12.- Supplementary Detector

A3.13 Cut Out Contacts

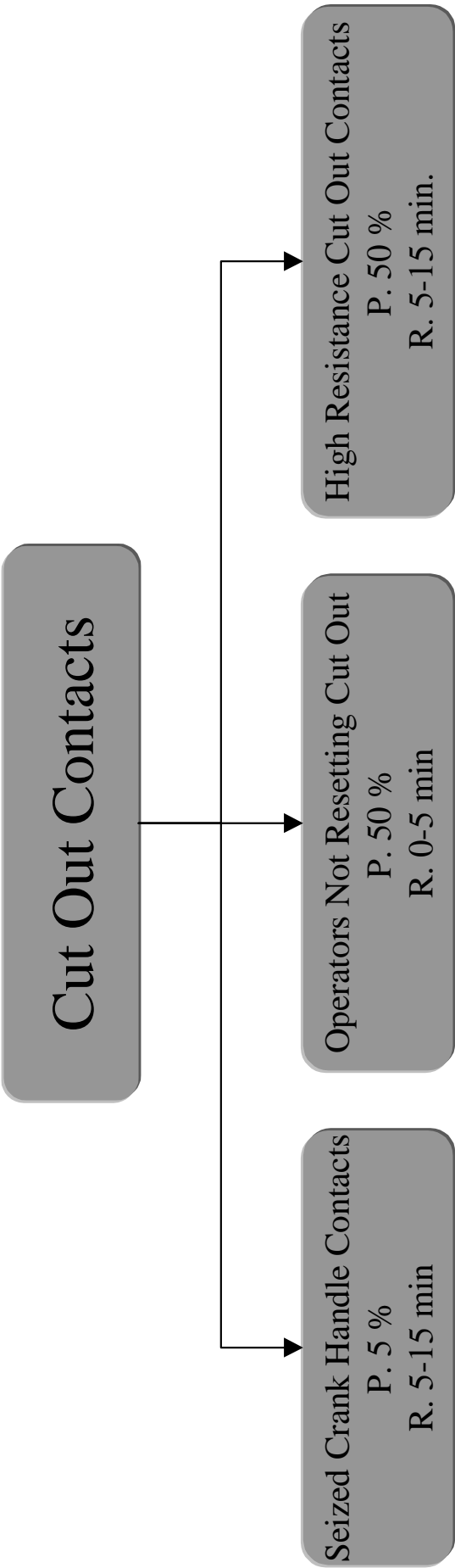


Figura A3.13.- Cut Out Contacts

A3.14 HW Detection

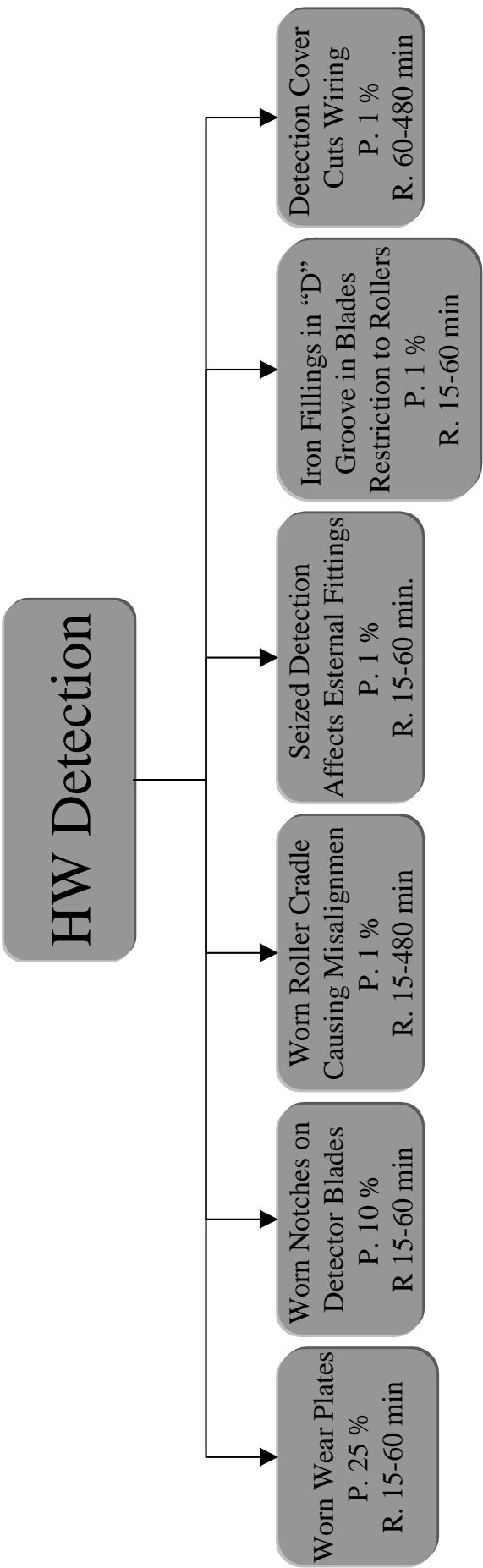


Figura A3.14.- HW Detection

A3.15 Backdrive

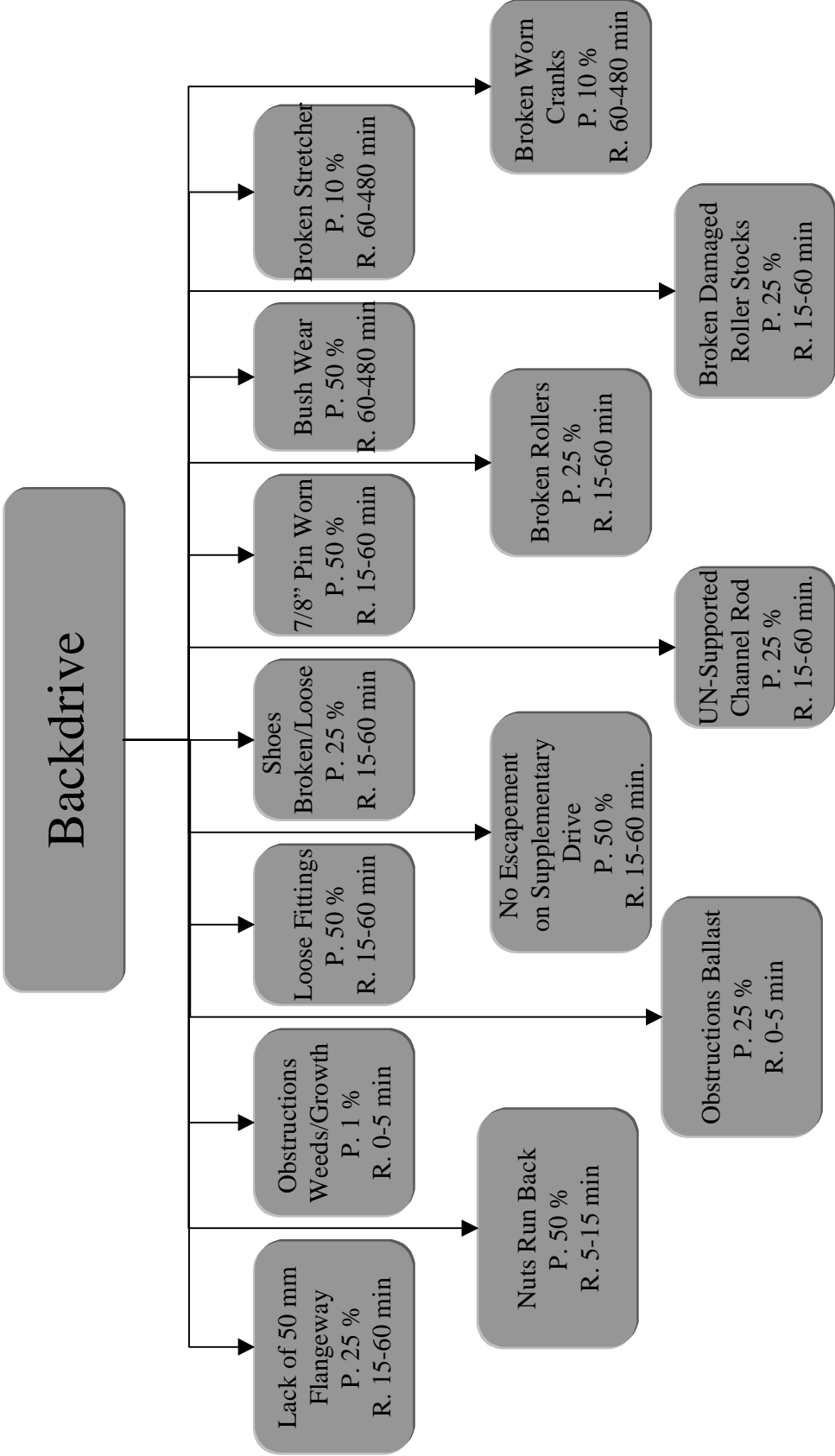


Figura A3.15.- Backdrive

A3.16 Rail Clamp Locks

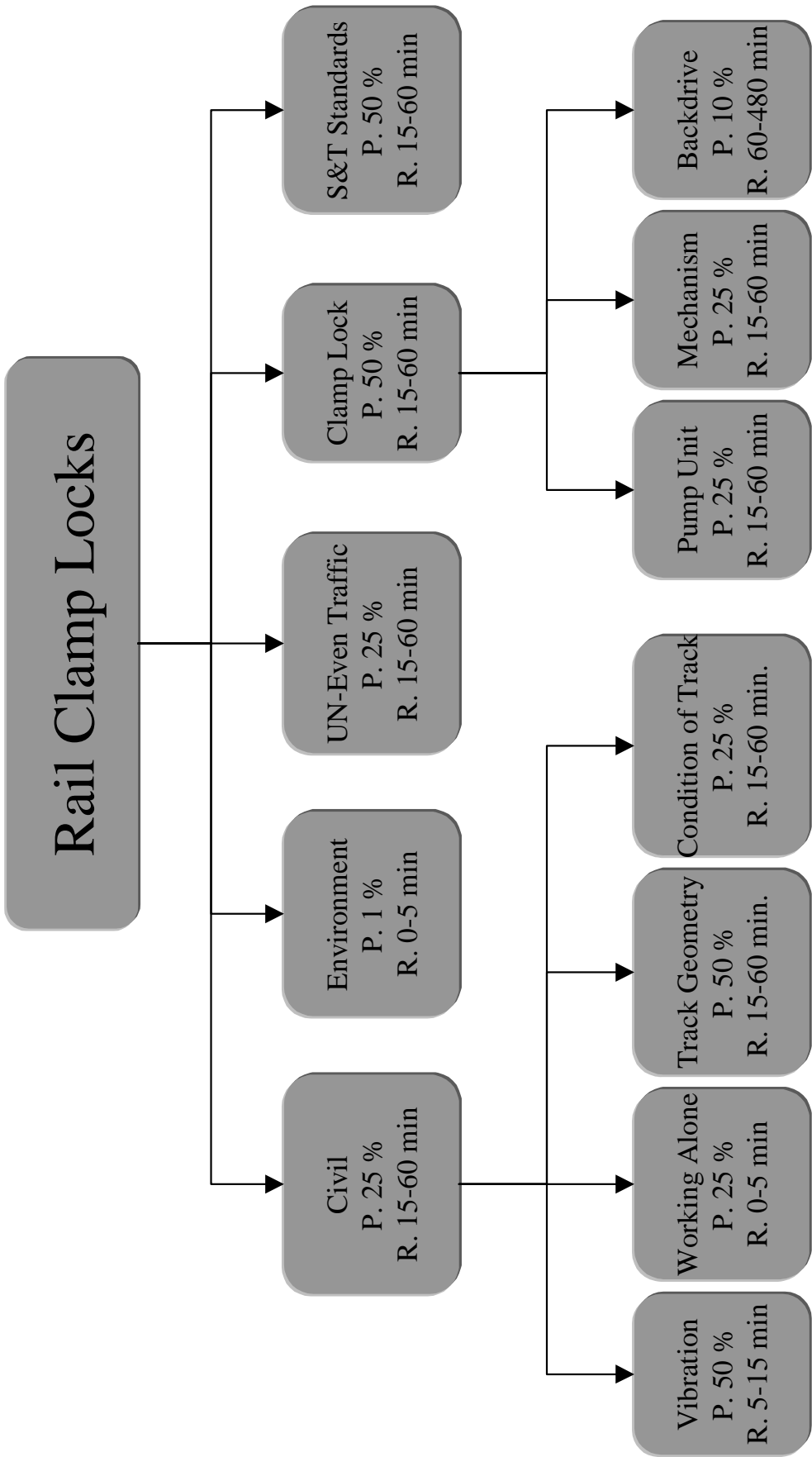


Figura A3.16.- Rail Clamp Locks

A3.17 Pump Unit

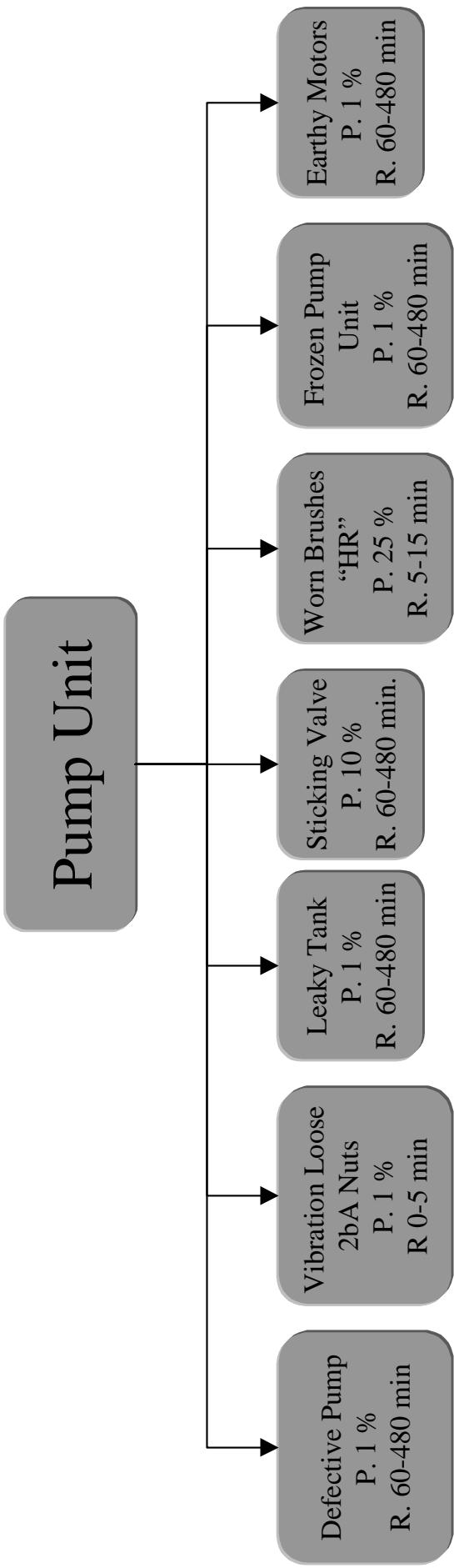


Figura A3.17.- Pump Unit

A3.18 Rail Clamp Locks

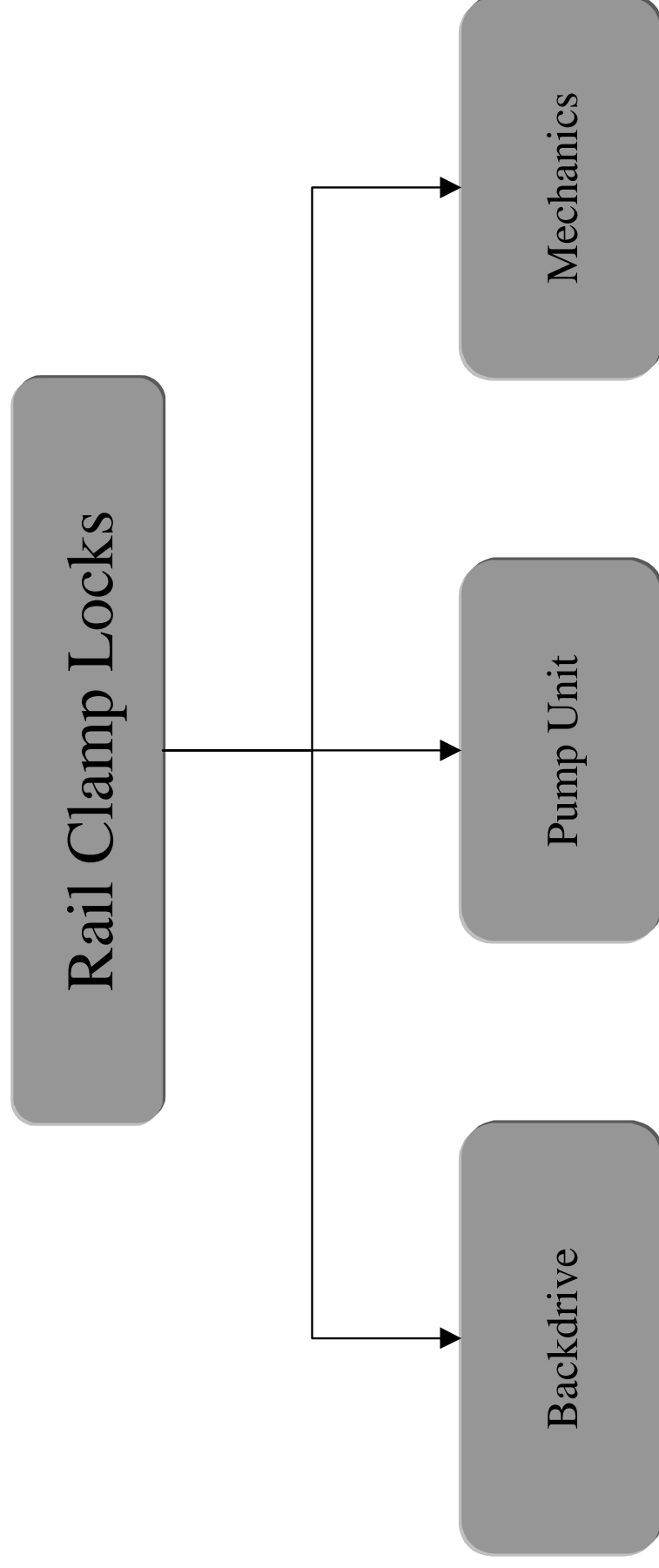


Figura A3.18.- Rail Clamp Locks Mechanism

A3.19 Mechanics

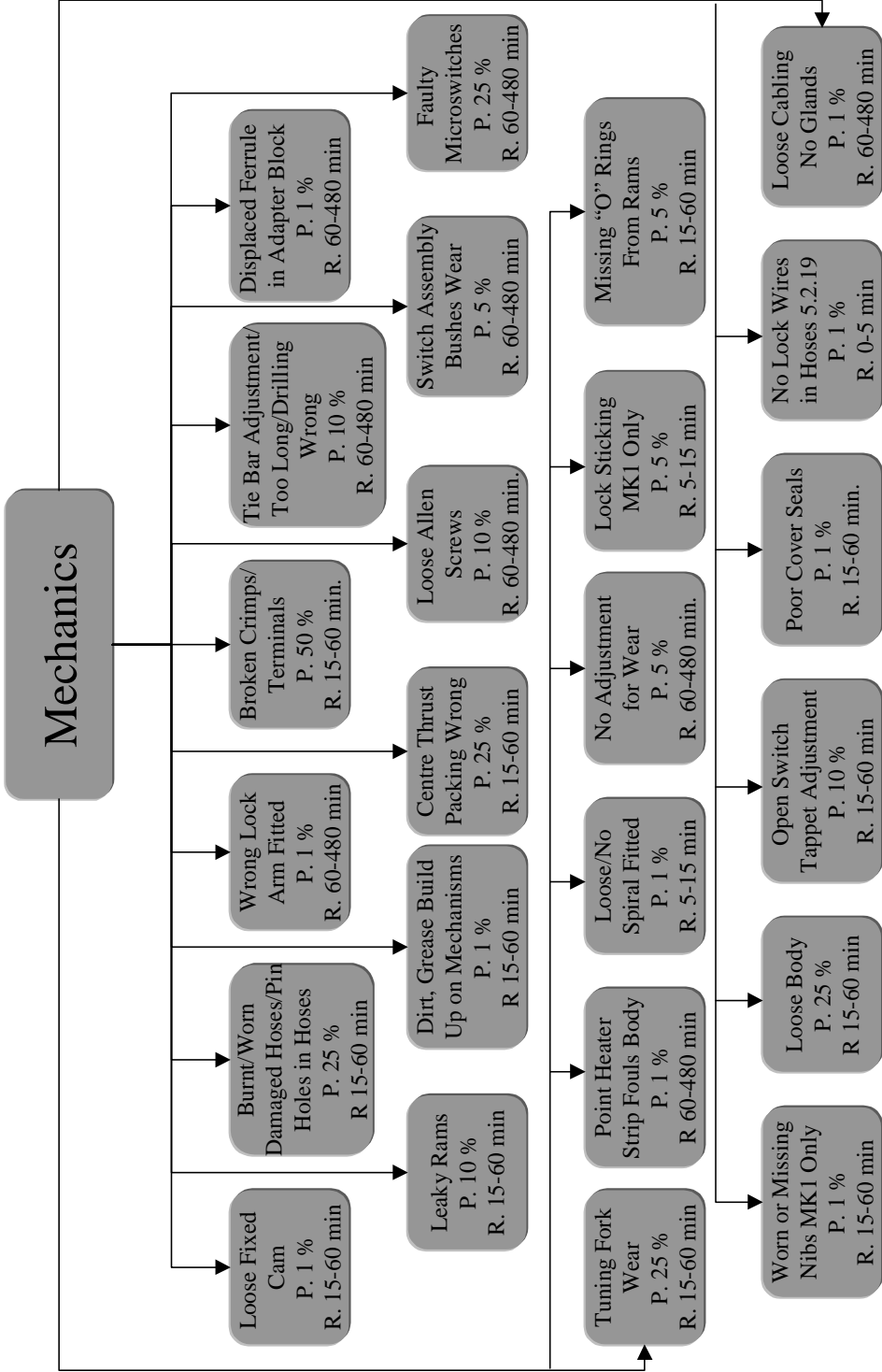


Figura A3.19.- Mechanics

A3.20 UN-Even Traffic Patterns

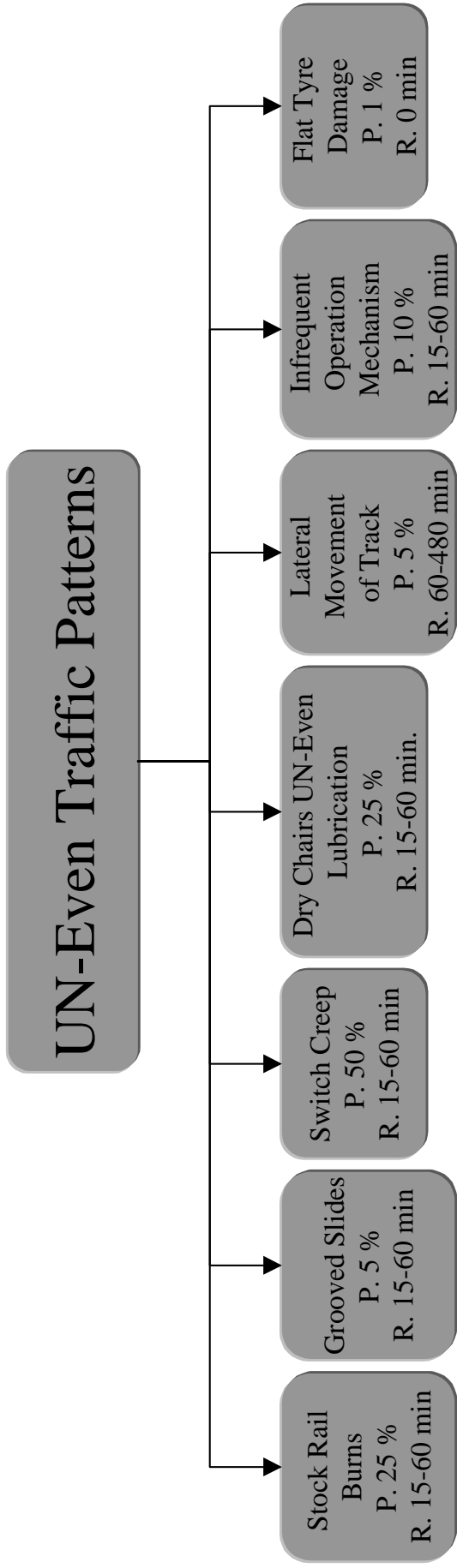


Figura A3.20.- UN-Even Traffic Patterns

A3.21 S&T Standards

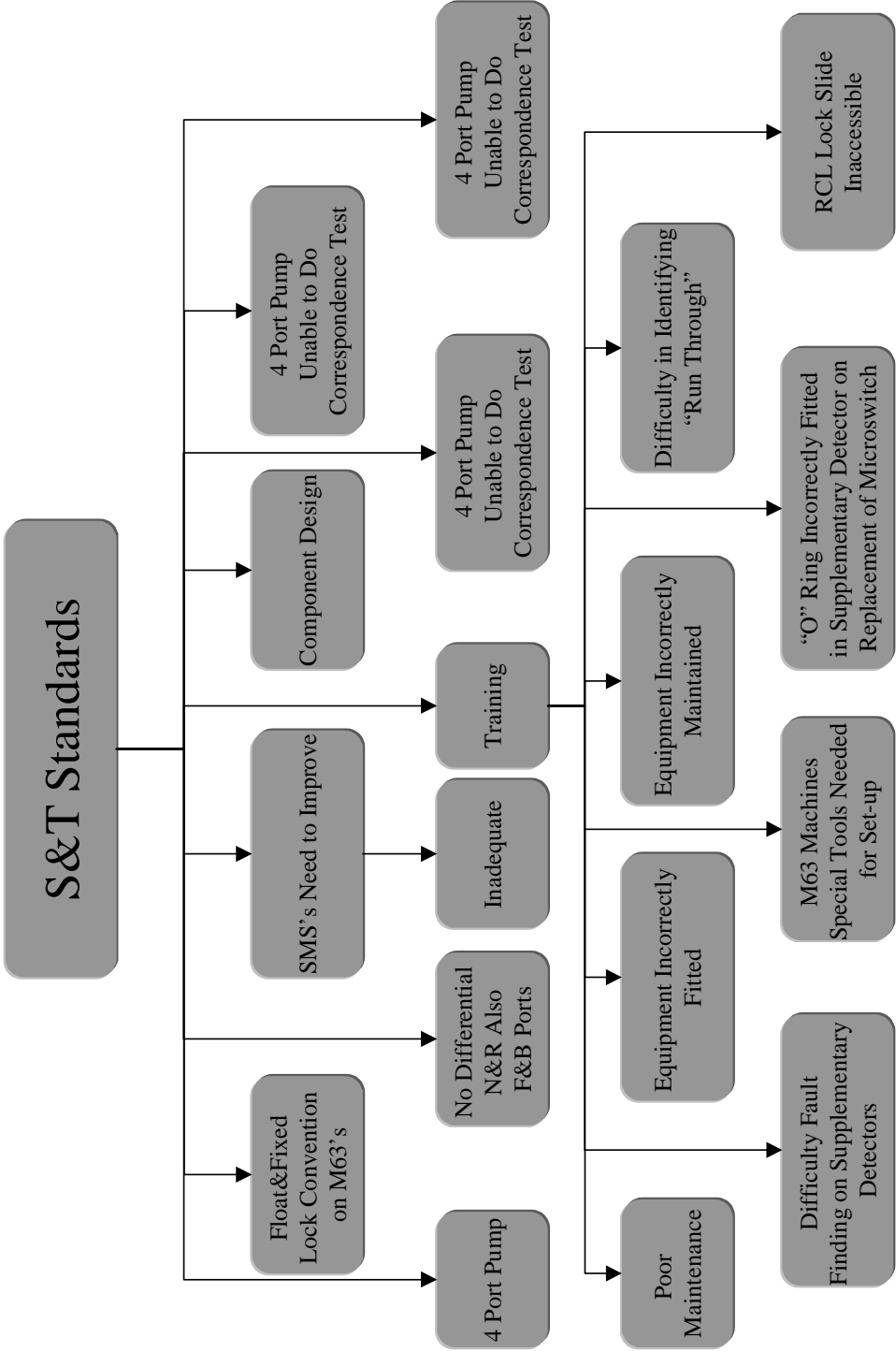


Figura A3.21.- S&T Standards

A3.22 M63 Point Failures

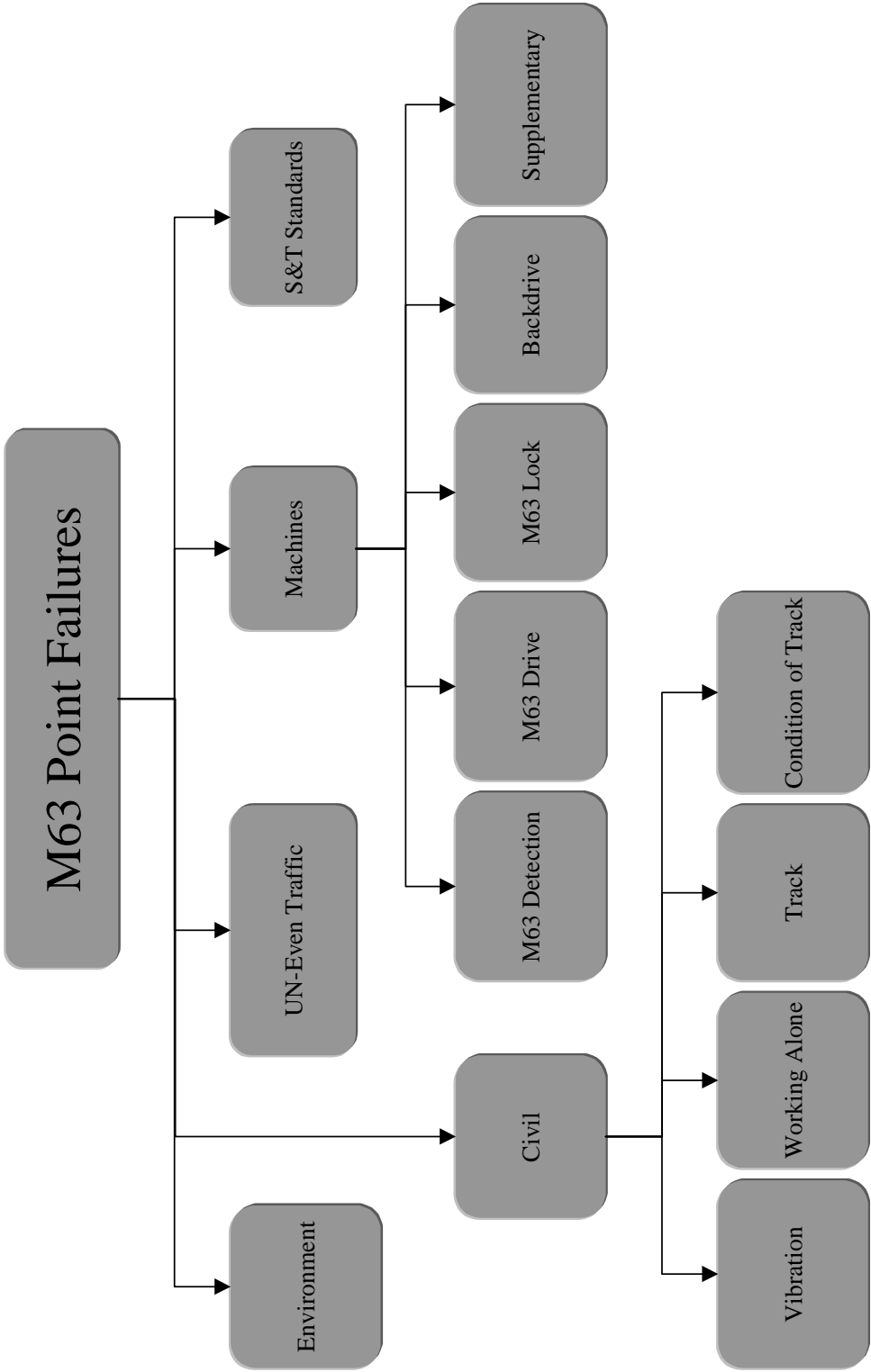


Figura A3.22.- M63 Point Failures

A3.23 M63 Drive

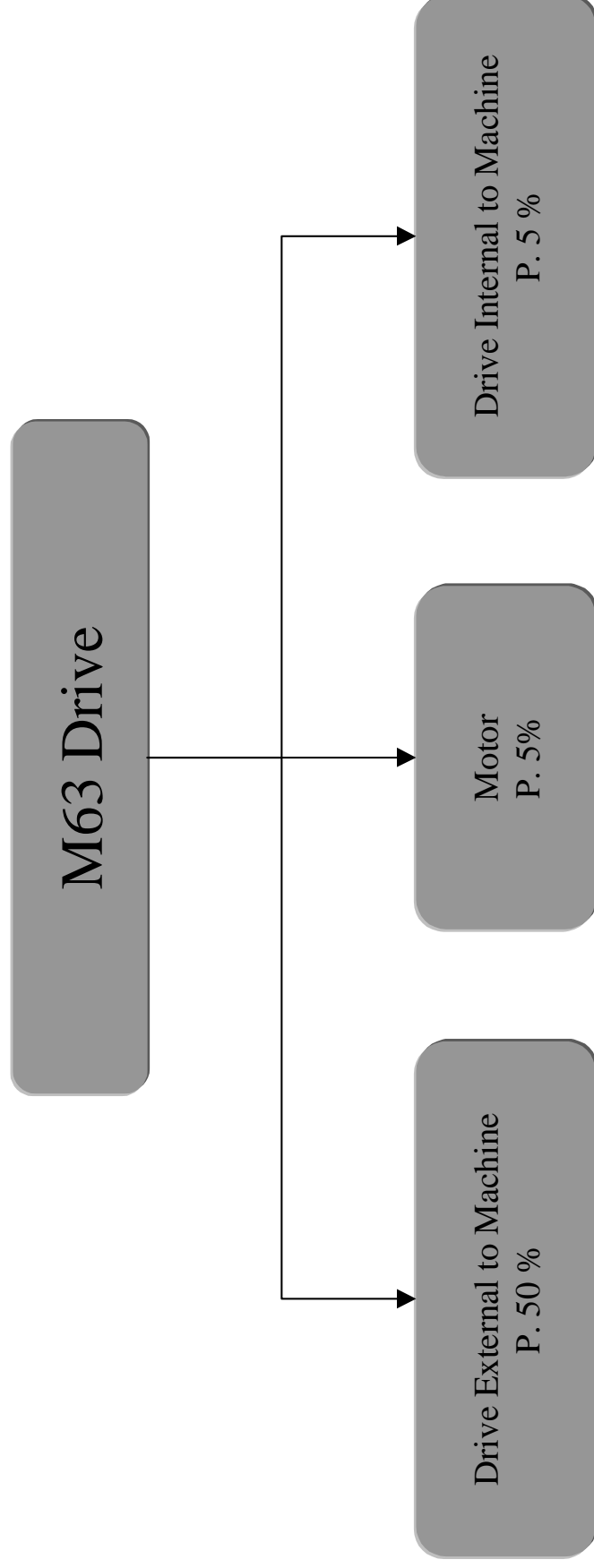


Figura A3.23.- M63 Drive

A3.24 Drive External to Machine

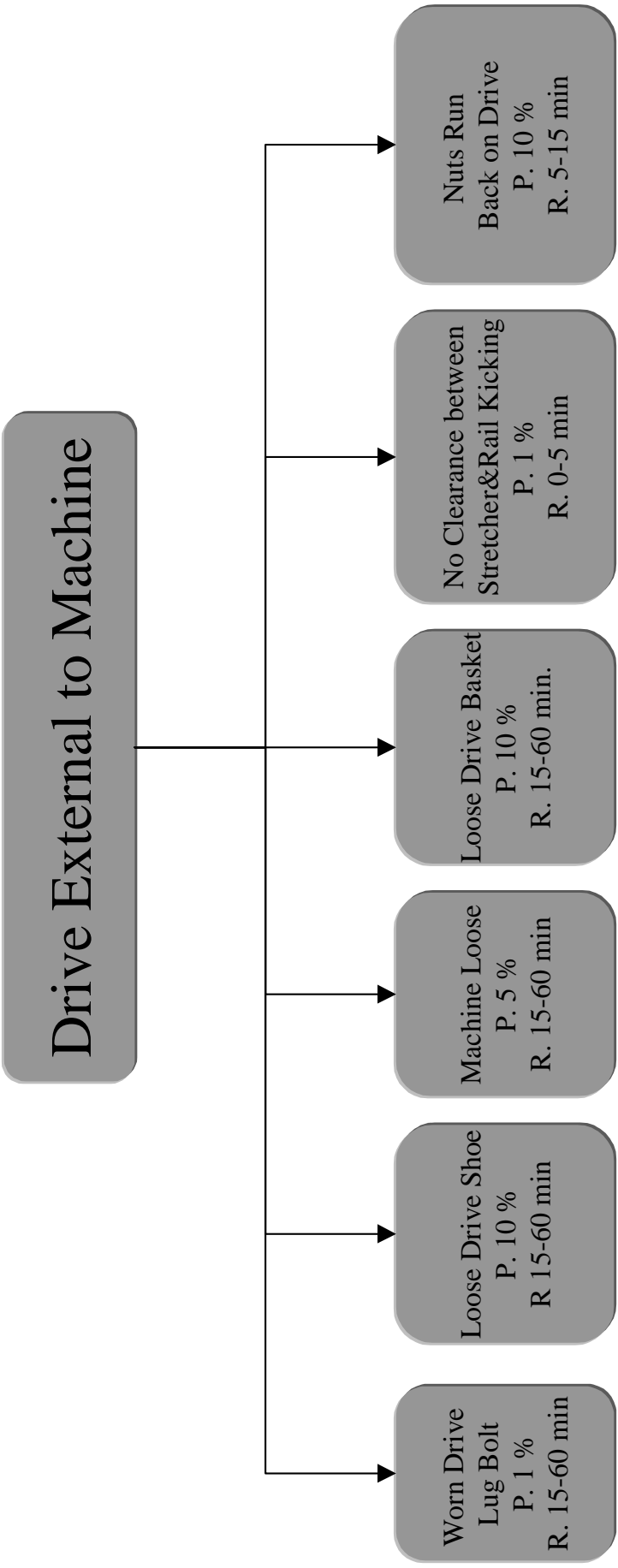


Figura A3.24.- Drive External to Machine

A3.25 Drive Internal to Machine

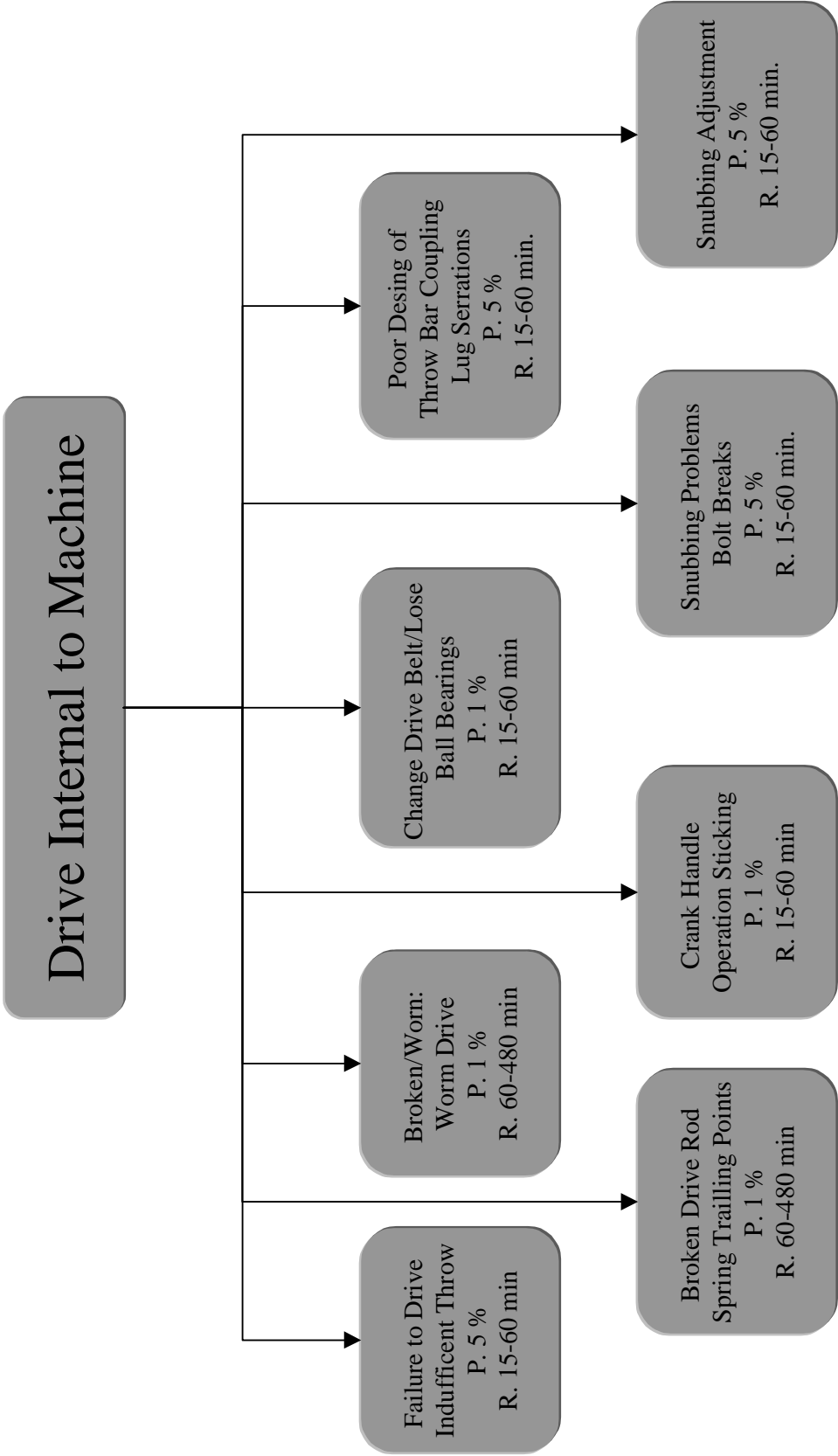


Figura A3.25.- Drive Internal to Machine

A3.26 M63 Lock

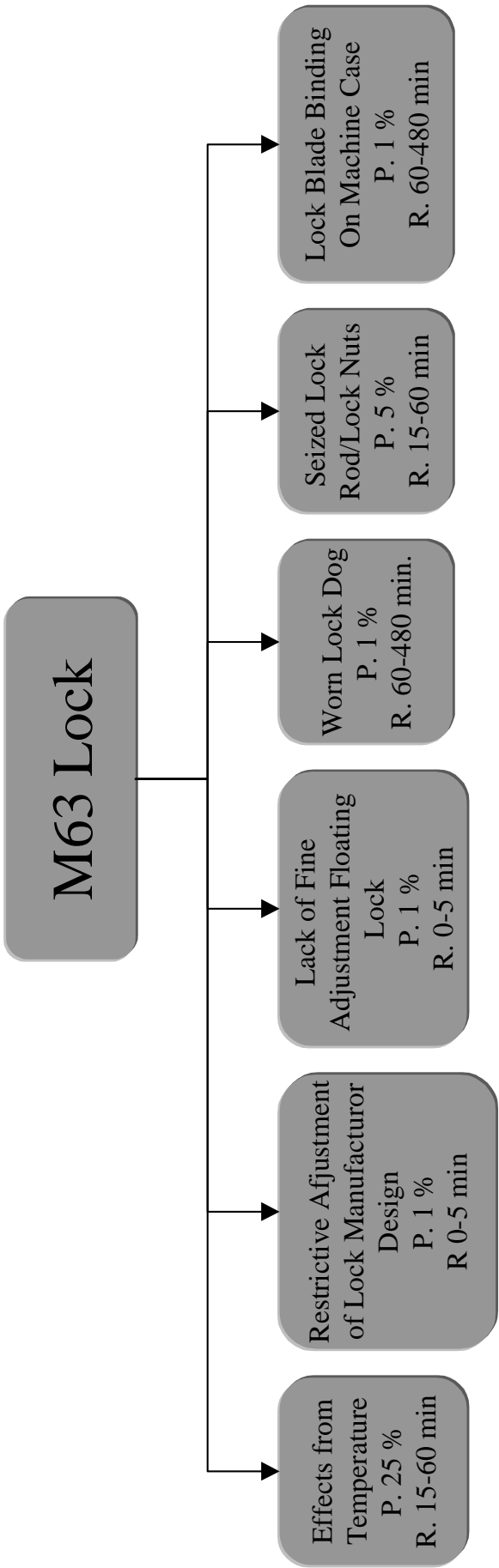


Figura A3.26.- M63 Lock

A3.27 M63 Detection

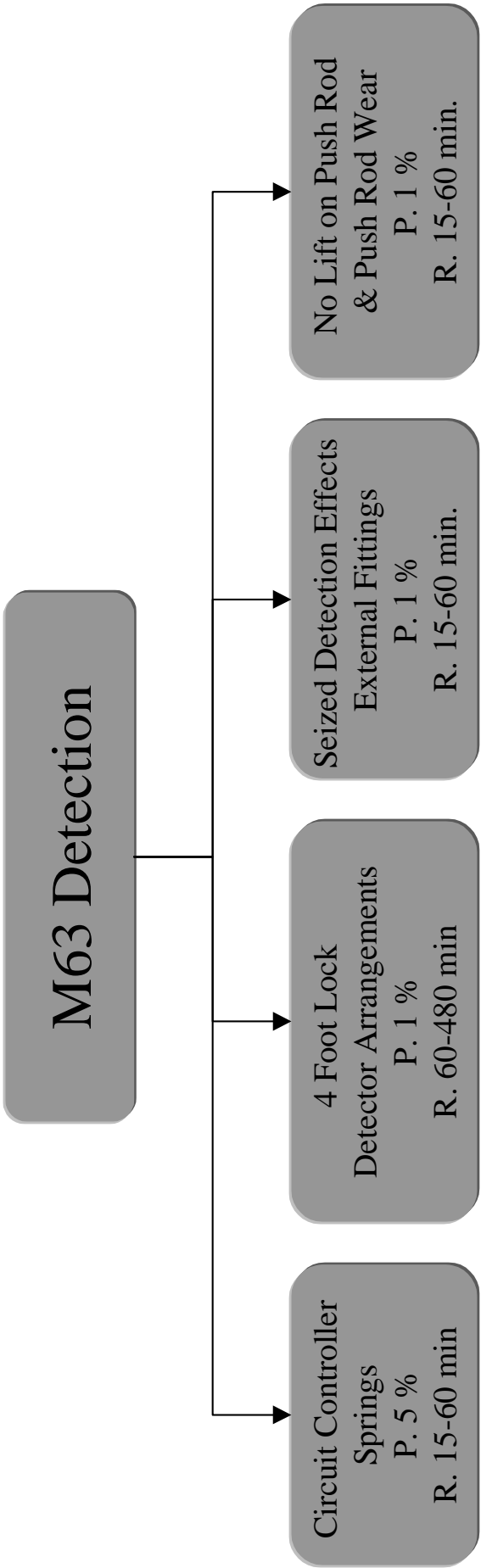


Figura A3.27.- M63 Detection

Anexo IV. Clasificación de Fallos en los en los Desvíos Ferroviarios

Reference: “Force (N) vs. Time(s)” Curves	Reverse to Normal Direction	Normal to Reverse Direction
Curves over to reference curves at the end of the process	12mm obstruction at fifth bearer on normal side of points 12mm obstruction at fourth bearer on normal side of switch 12mm obstruction at second bearer on normal side of points 12mm obstruction at seventh bearer on normal side of points 12mm obstruction at sixth bearer on normal side of points 12mm obstruction at third bearer on normal side of points 12mm obstruction at toe on normal side of points 12mm obstruction at eighth bearer on normal side of points Back drive tight end at heal end (RHS tight end) Diode snubbing block disconnected Back drive overdriving at heel on normal side with dry slide chairs Back drive overdriving at heel on normal side with lubricated slide chairs	
	Back drive slack end off at toe end (LHS drive basket slack end off) Back drive slack end off at toe end (LHS side drive basket slack end off) Drive basket loose Drive rod stretcher bar loose RHS Lubricated slide chairs Back drive overdriving at heel on reverse side with lubricated slide chairs	12mm obstruction at toe on reverse side of points 12mm obstruction at fourth bearer on reverse side of points 12mm obstruction at eighth bearer on reverse side of points 12mm obstruction at seventh bearer on reverse side of points 12mm obstruction at sixth bearer on reverse side of points 12mm obstruction at fifth bearer on reverse side of points 12mm obstruction in second bearer on reverse side of points Back drive overdriving at heel on reverse side with lubricated slide chairs Back drive overdriving at heel on normal side with dry slide chairs
Curves under to reference curves at the end of the process		

Curves under to reference curves at the begin of the process		Drive basket loose Lubricated slide chairs
Curves over to reference curves at the begin of the process		Back drive tight end at heel end (RHS tight end)
Curves that begin over and finish under to reference curves	Drive basket loose	Back drive overdriving at heel on normal side with lubricated slide chairs
	Drive rod stretcher bar loose RHS	Back drive tight end at heel end (LHS tight end)
		Diode snubbing block disconnected
		Low tension on motor brush
		Tight lock on reverse side (Sand on all bearers on both sides) Dry slide chairs
Curves that begin under and finish over to reference curves	Back drive tight end at hell end (LHS tight end)	
	Diode snubbing block disconnected	
	Tight lock on reverse side (Sand on all bearers on both sides)	
	Dry slide chairs	
	Operational contact in original position	
Curves that begin and finish over to reference curves	Operational contact slack end off by four holes	
	Operational contact slack end off by three holes	
	Operational contact slack end off by two holes	
	Back drive overdriving at heel of points on reverse side with dry slide chairs	
		Drive rod stretcher bar loose RHS
Curves that begin and finish under to reference curves		
Other curve that could not be classified	Back drive slack end off at toe end (RHS drive basket slack end off)	Back drive slack end off at toe end (RHS drive basket slack end off)

Tabla A4.1.- Clasificación de Fallos en los en los Desvíos Ferroviarios [16]

Anexo V. Breve biografía de Rudolph Emil Kalman

Rudolph Emil Kalman (Figura A5.) nació en Budapest, Hungría, el 19 de mayo de 1930. Obtuvo el grado de bachiller (Bachelor's Degree, S.B.) y el de master en la especialidad de ingeniería eléctrica (Master's Degree, S.M.) en la universidad de Massachusetts Institute of Technology, EEUU, en los años 1953 y 1954 respectivamente. El grado de Doctor (Doctorate Degree, D.Sci.) lo recibió en el año 1957 por la universidad de Columbia (EEUU). Entre sus cargos más destacados están la de investigador matemático en el Research Institute for Advanced Study (R.I.A.S.), en Baltimore (EEUU), entre los años 1958 y 1964, catedrático en la Universidad de Stanford entre los años 1964 y 1971, y Graduate Research Professor and Director del Center for Mathematical System Theory de la Universidad de Florida, en Gainesville (EEUU), entre los años 1971 y 1992. Además, desde 1973 es director de Mathematical System Theory at the ETH (Swiss Federal Institute of Technology), en Zurich (Suiza). Ha recibido numerosos premios como es la medalla de honor del IEEE en 1974, la medalla Centenal del IEEE, el premio Kyoto en alta tecnología de la fundación Inamori en 1985 (Japón), el premio Steele de la American Mathematical Society en 1987 (EEUU) y el premio Bellman en 1997. Es miembro de la National Academy of Sciences (EEUU), la National Academy of Engineering (EEUU), y de American Academy of Arts and Sciences (EEUU). Es miembro foráneo de Hungarian (Francia) y la Russian Academies of Science (Rusia).

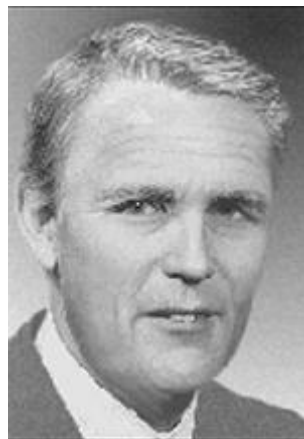


Figura A5.1.- Rudolph Emil Kalman

Anexo VI. Filtro de Kalman y Algoritmo de Suavizado Fijo

Dado el sistema de Espacio de los Estados (5.45) descrito en el capítulo

$$\text{Ecuaciones de Estado : } \mathbf{x}_{t+1} = \Phi_t \mathbf{x}_t + \Gamma_t \mathbf{u}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{w}_t$$

$$\text{Ecuaciones de Medida : } \mathbf{z}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{D}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{C}_t \mathbf{v}_t$$

$$\text{Var}(\mathbf{w}_t) = \mathbf{Q}_t \quad \text{Var}(\mathbf{v}_t) = \mathbf{R}_t$$

los algoritmos recursivos empleados para la estimación óptima del estado, así como maximizar la probabilidad de la estimación de los hiper-parámetros, pueden encontrarse en las siguientes referencias [35], [3], [6], [20], [26], [27] y [38]. En el caso particular presentado anteriormente, los algoritmos son los siguientes:

1. Filtro de Kalman:

a) Ecuaciones de predicción:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} = \Phi_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \Gamma_t \mathbf{u}_t$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} = \Phi_t \hat{\mathbf{P}}_{t-1} \Phi_t^T + \mathbf{E}_t \mathbf{Q}_t \mathbf{E}_t^T$$

b) Ecuaciones de actualización:

$$\mathbf{F}_t = [\mathbf{C}_t \mathbf{R}_t \mathbf{C}_t^T + \mathbf{H}_t \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T]$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} + \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T \mathbf{F}_t^{-1} (\mathbf{z}_t - \mathbf{H}_t \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} - \Gamma_t \mathbf{u}_t)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t = \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} - \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T \mathbf{F}_t^{-1} \mathbf{H}_t \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1}$$

2. Algoritmo de Suavizado Fijo

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|N} = \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} + \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{s}_{t-1}$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{t|N} = \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} - \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{S}_{t-1} \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1}$$

$$\mathbf{s}_{t-1} = \mathbf{H}_t^T \mathbf{F}_t^{-1} (\mathbf{z}_t - \mathbf{H}_t \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} - \Gamma_t \mathbf{u}_t) + \overline{\Phi}_t^T \mathbf{s}_t \quad \text{con } \mathbf{s}_N = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{S}_{t-1} = \mathbf{H}_t^T \mathbf{F}_t^{-1} \mathbf{H}_t + \overline{\Phi}_t^T \mathbf{S}_t \overline{\Phi}_t \quad \text{con } \mathbf{S}_N = \mathbf{0}$$

$$\overline{\Phi}_t = \Phi_t - \Phi_t \hat{\mathbf{P}}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T \mathbf{F}_t^{-1} \mathbf{H}_t$$

6 Summary, Results and Conclusions

Using intelligent monitoring systems, it is possible to predict problems and enable quick recovery before component failures disrupt operations. In this thesis the application of remote condition monitoring to points mechanisms and their operation has been described, and algorithms which may be used to identify incipient failures have been identified.

A Kalman Filter has been applied to the linear discrete data filtering problem encountered when using current sensor data in a points condition monitoring system. The main reason for applying Kalman filtering in this study was to increase the reliability of the model presented to the rule based decision mechanism.

This has been compared with the Unobserved Components model set up in a State Space framework, in which well-known recursive algorithms are essential in order to estimate and forecast the state evolution of the system, as well as estimating the unknown elements of the system by Maximum Likelihood.

In this chapter a summary of the thesis and the main results are included in order to make the contents easier to understand to English speakers. All this material is already included in the previous chapters in an expanded form. Finally, the main conclusions are synthesised.

Index of Contents

- 6 Summary, Results and Conclusions 257**
- 6.1 Summary 259**
- 6.2 Results 261**
 - 6.2.1 Model results with and without filtering 261
 - 6.2.2 RCM² based on unobserved components models..... 265
- 6.3 Conclusions..... 266**

6.1 Summary

Railway operations in Europe have changed dramatically since the early 1990s, partly as a result of new European Union Directives. Performance targets have become more and more exacting, due to reductions in state support for railways and increasing traffic. More intensive operations also place greater demands on the hardware of the railway. This is true for both rolling stock and infrastructure components but the author of this thesis focus on the latter, and, more particularly, on points which are key elements of the railway infrastructure (like turnouts).

Railway operations, with the exception of horizontal lifts, require points to allow individual vehicles and trains to change between routes, to access storage sidings and station tracks and to bypass obstacles.

Point mechanisms are among the last remaining “fail hard” elements of the railway. There are now many situations where failures of individual points can cause total system shutdowns with potentially very high losses, both in terms of operational difficulties and consequential cost. Another important consequence is their effect on operational schedules under severe track conditions. Preventing such problems is therefore important for a reliable passenger service. Point must offer a high level of safety, they must operate reliably with minimised maintenance cost. As show in the thesis, this can be carried out with methods for condition monitoring systems to aid the planning of preventive maintenance and operational policies.

Using intelligent monitoring systems, it is possible to predict problems and enable quick recovery before component failures disrupt operations. Research teams at the University of Sheffield (UK) and University of Castilla-La Mancha (Spain) have studied the application of Remote Condition Monitoring to points mechanisms and their operation, and have identified algorithms which may be used to identify incipient failures.

The first objective of the present project was to develop a monitoring system which applied reliability centred maintenance methods for optimizing the maintenance management of point mechanisms. The aim waste realise quantifiable improvements in the cost effectiveness, reliability and availability. In this thesis, the author presents a case study of decision modeling applied to condition monitoring of point mechanisms.

Reliability-Centred Maintenance (RCM₁) is a process used to decide what must be done to ensure that any physical asset, system or process continues to do whatever its users want it to do. Therefore, RCM₁ provides powerful rules for deciding whether a failure management policy is technically appropriate, providing precise criteria for deciding how often routine tasks should be carried out. RCM₁ identifies ways in which the system can fail to live up these expectations. This must generally be followed by a Failure Mode and Effects Analysis which allows an

assessment of the consequences of failure. As substantial number of research projects concerning railway infrastructure have been carried out or are still in progress, for example, REMAIN (Reliability and Maintainability in European Rail Transport), ROMAIN (Railway Open Maintenance Tool), INFRACOST (The Cost of Railway Infrastructure), RAIL (Reliability Centred Maintenance Approach to Infrastructure and Logistic of Railway Operation), all of which justify the contribution of RCM₁ for point mechanism in improving the safety and reliability of railways.

Failure Modes and Effect Analysis, FMEA, is a systematic analysis of the potential failure modes of a component a system. It includes the identification of possible failure modes, determination of the potential causes and consequences and an analysis of the associated risk. It also includes a record of corrective actions or controls implemented resulting in a detailed control plan. FMEAs can be performed on both the product and the process. Typically, an FMEA is performed at the component level, starting with potential failures and then tracing their effects up to the ultimate consequences. The FMEA allows the identification of the most critical components and the likely failure mechanisms, thus leading to the specification of system parameters to be monitored.

Primary performance parameters of complex mechanisms, such as railway points, are speed of movement, vibration, supply voltage, power, throwing time, temperature, current, force, etc. Based on these performance parameters, RCM₁ can be used to define terms such as risk, quality, control, comfort, economy, containment, ergonomics, etc. In practice, condition based maintenance decisions are based substantially upon assessments of the condition of the system obtained at discrete monitoring time intervals. This type of condition monitoring is called indirect condition monitoring in contrast to direct monitoring which measures the actual condition. The latter employs advanced electronics, sensors and transducers, computing and communications technology. Their measurement (vibration, supply voltage, power...) can be embodied in Remote Condition Monitoring systems (RCM₂). RCM₂ leads to improved reliability and can pay for itself in terms of cost-effectiveness since staff do not have to visit installations as frequently. The integration of the two types of RCM_i is called RCM², with the overall aim of using advanced electronics, control, computing and communication technologies to address the multiple objectives of cost effectiveness, improved reliability and services.

In addition to the data collection required for RCM² it is also necessary to process the large amount of information to provide a warning when the device moves out of tolerance or adjustments. Algorithm design for the detection of trends and failure patterns has been undertaken by many researchers but only a few papers dealing with the dynamics of railway turnouts have been found in the literature. The present thesis describes a simple approach to RCM² as applied to railway turnout mechanisms in a case study.

In point mechanisms, it is important that faults can be detected quickly and with reliability. It is a discrete dynamic system, where data is read in real time. The model must be simple to detect faults quickly. Data analysis must be in real time. On the other hand, the model for detecting faults must adapt to external conditions, i.e. the environment (humidity, temperature climatic,...), variations in friction force, etc, and the model must detect faults in both directions of the point mechanism movement. The author thus need a dynamic reference system. This is provided by using the geometric mean between the last reference and the new curve without a fault.

In the experiments, the state of the point mechanism was estimated from noisy sensor information. Therefore, a lot of false alarms were detected. These false alarms are undesirable, due to the cost of searching and attempting to repair a non existent fault. The author has employed a Kalman Filter to increase the reliability of the model for detecting faults in point mechanisms. The Kalman Filter is an optimal recursive data processing algorithm which is in the form of a set of equations that allows an estimate to be updated once a new observation becomes available. Applied to the discrete data linear filtering problem it is a powerful algorithm, because it supports estimations of past, present and future states. It can assist in deploying predictive maintenance.

6.2 Results

A total of 151 experiments were carried out by the industrial sponsor, 79 with operation in the reverse to normal direction and 72 in the normal to reverse direction. Force [N] and current [A] data were collected as a function of time [s].

The author has carried out experiments to study the performance of each criterion by varying the relevant parameters both with the Kalman Filter and without and we found that by employing a Kalman Filter we can improve the performance regardless of the parameters used for the criteria.

The data collected refers to force [N] versus time [s]. The first conclusion after studying these curves is that we can detect only a few faults by analysing the signal directly but, if we analyse the differences between the current data and the reference data in the form of absolute values, we can detect the majority of faults as they develop.

6.2.1 Model results with and without filtering

Three criteria have been considered for this model:

- i) Irregularities in the curve shape.
- ii) Deviation of maximum value position from that of signatures without faults.
- iii) Signature symmetry with respect to the maximum value position.

First Criterion

The irregularity in these curves requires the application of a sensitivity value for perturbations in the signal.

If we allow a small perturbation (14 N) in the reverse to normal direction, 12 curves remain undetected. The first criterion applied to the normal to reverse direction has the same number of undetected curves, with a perturbation of 17 N. However, only three of the same faults are not detected in both directions.

Employing the first criterion, in the reverse to normal direction we can detect, 84.21 % of faults and, in the other direction, 81.16 % of faults. Since the reference curve is dynamic, when it moves too far away from the “as-commissioned” signature, it is difficult to locate. Consequently, some of the faulty signatures cannot be detected and further criteria became necessary.

Second Criterion

Deviation of maximum value position from that of signatures without faults. In general, the second criterion is based in the maximum time of current data, when new data indicates a failure if $t_{\max}^j \notin [t_{\max}^i - t_{mg}, t_{\max}^i + t_{mg}]$ where t^j is the maximum time of current data, t^i the maximum time of reference data and t_{mg} the time margin.

Employing as small a margin as possible (± 0.3 s) for detecting the signals without faults (“as commissioned” signals), 70 of the 76 curves in the reverse to normal direction are eliminated as being associated with faults. The remaining 9 curves include the “as commissioned curves”. Therefore, 6.58 % of faults remain to be monitored.

Employing the same criterion for the normal to reverse direction, again with the smallest margin possible (± 0.3 s), 94.21 % of faults are detected, with 4 (5,79 %) undetected.

Third Criterion

Signature symmetry with respect to the maximum value position. Assuming that the curve areas on both sides of the maximum value position equate to triangles, we measure the areas of both triangles independently and compare their base relationships. This assumption has been demonstrated to be acceptable through numerous simulations and experiments.

Applying the third criterion in the reverse to normal direction, only 5 curves are not filtered and 97.37 % of faults are detected. With the new criterion we can improve the detection of faults by 13.16 % with respect to the first criterion. In the other direction, normal to reverse direction, 6

curves are not filtered, and 95.65 % of faults are detected, improving by 14.5 % with respect to the first criterion.

Usually, signals and measurements in condition monitoring systems will suffer from distortion and electrical noise. Such noise could cause the system to detect faults in the mechanism, where none exist.

The first purpose of the study reported in this thesis was to develop an algorithm that can filter noise out of the measurement. This will lead to move reliability in the measurement, in detecting faults and eliminating false alarms. Another purpose of in this study has been to detect faults before they can result in equipment failure.

The Kalman Filter is a recursive data processing algorithm which is generated in the form of a set of equations that allows an estimate to be updated once a new observation becomes available. It can generate an optimal estimate under certain conditions, for example, when a signal is affected by Gaussian white noise. When applied to the linear discrete data filtering problem it is a powerful algorithm, because it supports estimations of past, present and, most importantly, future states. It can therefore be used in predictive maintenance applications where data collected from sensors is frequently affected by measurement and transmission noise.

The parameter R is a characteristic of the sensor(s) used and will normally be given in a data sheet. This information was not available for the set up used in the tests and the value of R was therefore selected by the authors to demonstrate the behaviour of the filter. The parameters Q is also a hyper-parameter which is unknown and thus must be estimated. The authors have obtained suitable values empirically, because the Kalman Filter is applied to the model described above and its main function is to increase its efficiency rather than achieving an optimised solution. Optimal values for R and Q can be found by employing the maximum likelihood method in the time domain via prediction error decomposition. A sensor or set of sensors can then be chosen with the appropriate value of R . However, when the authors used the theoretically optimal values for R and Q the discovered that the performance was inferior to that obtained using the empirical values.

A brief summary of their results is as follows: After several simulations, the best filter effect was achieved empirically with $Q = 5 \cdot 10^{-2}$. If the filter has been trained to accept a large value of Q , e.g., $Q = 0.5$, the filter responds very quickly to the signal and thus cannot filter the process noise well. On the other hand, if it has a very small value of Q , e. g., $Q = 5 \cdot 10^{-3}$, the filter cannot adapt well to the real behaviour of the system.

The measurement error covariance is considered to have a value of $R = 0.1$ and to be constant. The best filter is achieved, again empirically, when $R = 0.1$. The selection of the value

for R should be counter to the selection of Q . If the filter is designed with a very small value for R , e.g., $R = 10^{-3}$, the filter responds very quickly to the real signal, but it cannot filter out the measurement noise well. On the other hand, if the R value is large, e.g., $R = 1$, the filter cannot adapt well to the real curve.

The algorithm must be initialised with an initial \hat{x}^- value for the algorithm. The author has carried out several experiments, and the best initial value for \hat{x}^- , for both operating directions, is $\hat{x}_{t=0}^- = 0$. Normally $\hat{x}_{t=0}^- = 0$, but it will not always be the same, so the initial value of P^- must be different from 0. In these cases, P^- is considered $P_{t=0}^- = 0.1$.

The author modified the theoretically perfect current signals by superimposing distortions of $+ 0.05$ A and $+ 0.1$ A to create artificial faults. These effectively represent periods where there is higher friction than during the remainder of the movement. The author studied the error signal curves with superimposed random noise “as measured” as well as the filtered curves and then compared them with the curves without faults. The author carried out 100 simulations to study the performance of the algorithm on filtered and non-filtered data. With small faults, 0.05 A, the filtered data allows the detection of faults in 29 % of simulations, whereas with the measured signal the algorithm can detect faults in only 13 % of simulations. The noise bandwidth that is being employed is 0.1 A, and this is the reason that it is such a small percentage. On the other hand, if a fault of 0.1 A is introduced, then the algorithm can detect this fault with the filter in 88 % of simulations, while it can detect this fault in only 50 % of simulations if it uses the signal as it is received from the sensors.

Employing the Kalman Filter with the three criteria, with ± 0.2 s as margin for the point of the maximum value, and 1.2 N with respect to curve perturbation, it is observed that only the “as commissioned” curves are not identified as faults. With this criterion, we can detect 100 % of the faults, and the time margin of the maximum value position is decreased by 33 %. The margin considered for the irregular curve form is decreased to 91.3 %. A further advantage of employing Kalman filtering is that the fault can be predicted 0.1 s earlier than before, considering that it is the next state that is being calculated.

For the normal to reverse direction, with a margin for the maximum value position of ± 0.7 s and a curve perturbation of 2 N, only two “as commissioned” curves and two fault curves are not detected. These latter signatures are created with the back heel overdriving at the heel on the normal side with lubricated slide chairs.

In this direction, we can thus detect 97.1 % of faults, 2.9 % better than without employing Kalman filtering. The time margin in the maximum value position is 0.4 s worse, but we are

predicting the fault 0.1 s earlier. The time margin considered for the irregular curve form decreases to 85.71 %.

6.2.2 RCM² based on unobserved components models

The model explored in this thesis to analyse point mechanism data in real time has been compared with the so called Unobserved Components (UC) class of models.

The usual way to treat this kind of models is by formulating them in a State Space (SS) framework. As a matter of fact the model (5.43), proposed in last chapter, are considered the *Observation Equations* of a discrete-time stochastic SS system. The model is completed with the so called *State Equations* which reflect all the dynamic behaviour of the system by relating the current value of the states to their past values as well as the deterministic and stochastic inputs.

Thereupon, given model (5.43) written in SS form, the estimation problem consists of finding the first and second order moments (mean and covariance) of the state vector, conditional on all the data in a sample. Provided that all disturbances in the model are Gaussian, a *Kalman Filter* produces the optimal estimates of such moments in the sense of minimising the Mean Squared Errors (MSE). An algorithm that is used in parallel with the Kalman Filter (KF) and is not so well-known in certain contexts is the *Fixed Interval Smoothing* (FIS) algorithm, which allows for an operation similar to that of the KF but with a different set of information.

The SS framework and the associated KF/FIS algorithms allow for a number of useful operations when dealing with real data.

The key parameter in the model is ρ . In fact, this parameter is proposed here as a way to discriminate between “faulty” and “as commissioned” curves. Strictly speaking, two curves are behaving in the same way when $\rho = 1$. Then, a cut-off value of ρ must be considered in order to discriminate between ‘good’ and ‘bad’ curves.

The modelling strategy outlined above may be applied to off-line situations, i.e. comparing full reference curves and new incoming curves, or to on-line situations, i.e. updating the model parameters (and especially ρ) as any single new data point is known.

Very fast algorithms have been developed for ML estimation of SS systems in which all the unknowns are some elements of the covariance matrices \mathbf{Q} and \mathbf{R} . This allows for the application of model (5.46), see chapter 5, in on-line situations even when the data is coming

rapidly and the parameters of the system must be updated quickly based on the new incoming information.

The classification of data curves “as commissioned” or “faulty” may be done in several ways. One is based only on the point estimate of ρ , in which case a high value should be chosen so that estimated ρ ’s below such boundary is an indication of a lack of correlation with the current reference curve and therefore is classified as “faulty”¹. But more refined and somewhat formal criteria may be based on such point estimate and its 95% confidence band. In this case, a curve is considered “as commissioned” if the upper limit of the confidence band reaches its boundary of 1 or at least is very close to it.

In the *Normal to Reverse Direction* a value of $\rho = 0.98$ produces 100% of faulty curves and 80% of “as commissioned” correctly classified (98.73% of overall cases). The model performance was remarkable producing two disjoint groups of curves, since the highest value of ρ for faulty curves were 0.85 and its 95% confidence interval is (0.66, 0.93), while the smallest ρ for the “as commissioned” curves were 0.99 with a confidence interval (0.95, 1).

In the *Reverse to Normal Direction* the same value of $\rho = 0.98$ produces 100% of faulty curves and 75% of “as commissioned” correctly classified (98.61% of overall cases). The highest value of ρ for faulty curves were 0.95 and its 95% confidence interval is (0.88, 0.98), while the smallest ρ for the “as commissioned” curves were 0.997 with a confidence interval (0.99, 0.9992).

But the power of the model and the recursive techniques briefly summarized in chapter 5 within the SS framework are better demonstrated in on-line situations. One important point highlighted above which is very useful in predictive maintenance is precisely the possibility of detecting failures in advance based on the forecast ability of the model.

6.3 Conclusions

In the present thesis a maintenance technique called RCM² has been applied to point mechanisms in railway infrastructures. The integration of RCM₁ and RCM₂ in this new maintenance approach RCM² has the following advantages:

- It can combine quantitative and qualitative information, e.g. the results of Failures Modes and Effects Analysis (FMEA) about the assets, and it permits to improve the performance by allowing prediction of failures, which reduces maintenance costs. Analogously, the inherent/designed reliability of the elements is improved, and in terms

¹ Alternatively, the estimated correlation coefficient may be tuned so that the number of curves correctly classified is maximised.

of cost-effectiveness is reduced too, since the staffs do not have to visit installations as frequently.

- It provides powerful rules for deciding whether a failure management policy is technically appropriate, providing precise criteria for deciding how often routine tasks should be carried out.
- The characteristics mentioned above require advanced electronics and computer and communications technology to gather useful information and knowledge about resources, mainly human and asset conditions. The engineers, operators, etc. use it as appropriate.
- In safety terms, it reduces the risk to the maintenance personnel and the general public.

The study is based on 476 signatures of a single point subjected to different artificially induced “fault” conditions, which were carried out by the industrial sponsor. Force [N] and current [A] data were collected as a function of time [s]. It is demonstrated in this document that employing only Force [N] versus Time [s] can detect the majority of failures. Thereupon, a total of 151 experiments were employed during tests, 79 with operation in the “reverse to normal” direction and 72 in the “normal to reverse” direction.

The author undertook the development of algorithms to detect gradual failure in railway turnouts which should allow a move to a RCM² approach to the management of switch and crossing maintenance.

Three criteria have been considered for this model: i) irregularities in the signal shape; ii) deviation of maximum value position of the curves without faults; iii) signature symmetry with respect to the maximum value position.

The first conclusion after studying the curves was that it was not possible to detect the faults directly by analysing the curves. However, when the difference between the actual data and the reference data in the form of absolute values was analysed, they could detect the majority of faults as they developed. Also, the model for detecting faults had to adapt to external conditions, like wear, changes in the environment and varying friction forces. To achieve this, a reference dynamic system for their analysis was chosen. This was based on calculating individually for the normal to reverse and reverse to normal operations the arithmetic mean between the previous reference data set and the latest new data set for operation in that direction, once it had been proved to be fault free. These criteria were used in a rule based decision process to identify whether the points were operating free of faults.

Using this model based in the criteria above, it detects 97.3 % of faults in reverse to normal direction and 94.2 % of faults in the other direction.

The noise in the curves was the main cause that some faults were not detected. Therefore the next purpose of the study was to develop an algorithm that can filter noise out of the measurement. This led to move reliability in the measurement, in detecting faults and eliminating false alarms. The Kalman Filter (KF) was used for preprocessing the data collected during tests.

This algorithm was applied to simulation experiments, in which the theoretically perfect current signals of + 0.05 A and + 0.1A were modified to create artificial faults by superimposing distortions. The error signal curves were studied with superimposed random noise as well as the filtered curves and then compared them with the curves without faults. With small faults (0.05 A), the filtered data allows the detection of 29 % of faults, whereas with the measured signal the model can detect only 13 % of faults. The noise bandwidth that is being employed is 0.1 A, and this is the reason that it is such a small percentage. On the other hand, if a fault of 0.1 A is introduced and the noise bandwidth is set at 0.1 A, then the algorithm can detect this fault with the filter in 88 % of simulations, while it can detect this fault in only 50 % of simulations if it uses the signal as it is received from the sensors.

When the Kalman Filter is applied to the actual data, the model can detect 100% of faults in the reverse to normal direction, while in the other direction, normal o reverse, 97.1 % of faults were detected. The margin for detecting irregularities and the margin in maximum position is reduced in both directions. It is not clear why detection in the normal to reverse is not as successful as for reverse to normal, but it seems that a minimum rejection rate have been achieved, though more research is necessary in order to clarify this point.

Another type of models have been applied to the same data, the so called Unobserved Components class of models formulated in a State Space (SS) framework. Provided that all disturbances in the model are Gaussian, the combination of the Kalman Filter and Fixed Interval Smoother algorithms produce the optimal estimates of the states of a system based on the whole data set, in the sense of minimising the Mean Squared Errors (MSE).

The specific model considered is a bivariate model composed of two time series, the reference curve on one hand and each of the rest of curves in turn, on the other hand. The model consists of a trend plus noise structure. In this model, the correlation between both trends (i.e. ρ) is considered as an indication of similarity between the curves and therefore the inexistence of failures. As a failure starts to develop this parameter tends to differ from one in a statistical sense. The cut-off value of the correlation coefficient relevant to discern 'good' and 'faulty' curves is selected on practical grounds based on past experience with this kind of data, but refined formal statistical criteria may be used as well.

In essence, the model performance is remarkable good in both the normal to reverse and reverse to normal directions, implying that the system is quite useful in detecting the faults of the devices involved. In addition, the system is able to detect faults in on-line situations as they develop in time (based on the estimation of the correlation parameter) and it is also capable of producing sensible forecasts of the future state of the system that allows the detection of potential failures before they occur in practice.

The present work may be extended in several ways, two of which are stressed here. Firstly, given the fact that not all the failures are equally important, a refined search based on models similar to (5.46) may be done in order to classify such failures. In the same way, different “as commissioned” curves may present different signatures, and that is the main reason why some of the “as commissioned” curves remain undetected with the present approach. A refined algorithm may be developed in order to take into account several types of “as commissioned” curves, in situations where enough data is available.

Secondly, a more theoretical extension, not pursued here because the results were wide clear, is the formal research of several aspects of the model in a statistical sense, the most important of which is the development of formal statistical hypothesis tests for ρ (whether it is one or less than one) and the rest of parameters.

Obviously, the research carried out in this thesis may be extended in many ways. For example, the models presented here may be applied and updated to other kind of data, particularly interesting is the application to this type of models to curve data taken on many time points, instead of just one; more comprehensive models that incorporate other measurements as inputs to the system; an economic analysis of the impact of these improvements may be carried out; etc.